

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica



TESIS DOCTORAL

**Claves metalúrgicas de la fabricación de espadas
con acero de Damasco (Al-hindi) según el taller
persa medieval del shamshirsaz Assad Allâh de
Isfahân**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Laura García Sánchez

Director

Antonio José Criado Portal

Madrid, 2011

ISBN: 978-84-695-0999-9

© Laura García Sánchez, 2011

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E
INGENIERÍA METALÚRGICA



*“Claves metalúrgicas de la fabricación de
espadas con acero de Damasco (al-hindi)
según el taller persa medieval del
shamshirsaz Ossad Allâh de Isfahân.”*

TESIS DOCTORAL

LAURA GARCÍA SÁNCHEZ
Madrid, 2011

LAURA GARCÍA SÁNCHEZ

“Claves metalúrgicas de la fabricación de espadas con acero de Damasco (al-hindi) según el taller persa medieval del shamshirsaz Assad Allâh de Isfahân.”

DIRECTOR: Profesor Dr. Antonio José Criado Portal.

TESIS DOCTORAL

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E

INGENIERÍA METALÚRGICA

Madrid, 2011



“La fragua de Vulcano”.
Diego de Velázquez (Sevilla, 1599- Madrid, 1660).

A mis padres, Piedad y Domingo

A mi hermano, Eduardo

ةفيلخا

عَيْنُ الْمَغْطَةِ

عَيْنُ طَالِبًا أَوْ عَلِيمًا
فَالْجَهْلُ عَيْنُ الْمَغْطَةِ
وَلَا يَصُدُّكَ يَا سَ
عَنْ نَيْلِ أَشْرَفِ خُطَمِهِ
فَبَدْءُ النَّارِ سَقَطٌ
وَأَوَّلُ الْخَطِّ نَقْطَةٌ

Ibn Jafāyā de Alzira
"Antología Poética"

Vive siempre
en busca de la sabiduría;
la ignorancia es la peor vergüenza.
que no te impida el hastío
alcanzar el mejor rango;
el comienzo del fuego
es la chispa
y el inicio del verso
unas gotas de tinta.

Ibn Jafāyā de Alzira
"Antología Poética"

Agradecimientos.

A mi director, el profesor Dr. Antonio José Criado Portal, por sumergirme y enseñarme el mágico mundo de la Metalurgia. Sin su sabiduría, paciencia, amistad y confianza en mí no hubiera podido realizar este sueño.

Al profesor Dr. Juan Antonio Martínez García, por su colaboración en cualquier momento a lo largo de la realización de este trabajo.

Al Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Complutense de Madrid, por poner a mi disposición todos los medios, tanto técnicos como humanos, para llevar a cabo esta investigación.

A los técnicos del Centro de Microscopía Electrónica "Luis Bru" (U.C.M.), por todas las horas dedicadas y, en especial, a Alfonso, por su amistad y gran ayuda.

A los miembros del Taller Mecánico, por su esmero y profesionalidad en los trabajos encargados.

A nuestro herrero particular, Juan Pozón, por sus incansables martillazos, su generosidad y su calidad humana.

Al Dr. José Manuel Mota Martín, por su ayuda cinematográfica y moral a lo largo de toda esta investigación.

A mis amigos del grupo de Química Médica, con los que he compartido los momentos de alegría y tristeza. Gracias por vuestro apoyo y amistad.

A mis compañeros y amigos de la facultad, por permitirme dedicarme a lo que más me gusta, aunque eso signifique robarles tiempo de estar juntos.

A mi hermano que siempre ha estado pendiente de mí, dispuesto a ayudarme y apoyarme sin condiciones.

Y por último, a mis padres por todo lo que han hecho por mí, y a quienes les debo mi vida.

índice	página
<u>I. INTRODUCCIÓN</u>	5
I. 1.- Investigación Histórica.	9
I.1.a.- Reseña histórica de Assad Allâh al-Isfahânî.	10
I.1.b.- Arqueometría y arqueometalurgia.	11
I.1.c.- Arqueometalurgia experimental.	13
I.1.d.- El legítimo acero de Damasco del taller de Assad Allâh: eficacia y belleza.	14
I.1.e.- El shamshir de Mehemet Alí y su historia.	39
I.1.f.- La imposibilidad de su forja en Occidente.	44
I.1.g.- Requisitos ópticos que permiten ver las bandas de carburos en los damascos.	46
I.1.h.- Espesores y distancias medios entre las bandas de carburos en las armas de Assad Allâh.	50
I.1.i.- Las bandas alternadas en claros y oscuros; una ilusión óptica perseguida en el arte.	52
I.1.j.- Desde cuándo y dónde se forjaron estos aceros.	57
I.1.k.- El acero de Damasco en Al Andalus.	62
I. 2.- Antecedentes de estudios científicos: crónicas medievales y noticias del siglo XIX.	69
I. 3.- Antecedentes científicos y tecnológicos del siglo XIX.	76
<u>II. PROPUESTA TECNOLÓGICA DE FABRICACIÓN DE ARMAS CON ACERO DE DAMASCO SEGÚN LA INVESTIGACIÓN HISTÓRICA Y ARQUEOMÉTRICA.</u>	82
<u>III. TÉCNICA EXPERIMENTAL.</u>	88
III. 1.- Obtención del acero base.	88
III.1.a.- Horno eléctrico.	88
III.1.b.- Materiales de partida.	89
III.1.c.- Fusión y colada: acero de Damasco directo y acero suave.	90
III.1.d.- Corte de los lingotes.	95
III. 2.- Obtención del wootz por carburización a alta temperatura.	96
III.2.a.- Horno eléctrico con resistencia de CSi (Carbolite).	97
III.2.b.- Preparación del crisol cerrado con hierro ARMCO y carbón de madera de encina.	98
III.2.c.- Introducción del crisol en el horno y calentamiento a 1340°C.	100

índice	página
III.2.d.- Extracción del crisol del horno, enfriamiento al aire y obtención del pequeño lingote por rotura del crisol.	101
III. 3.- Tratamiento de recocido de ablandamiento del acero de wootz, previo a la forja en caliente.	104
III.3.a.- Sellado del pequeño lingote (wootz) de acero de Damasco (al hindi) con arcilla humedecida (grea)	104
III.3.b.- Calentamiento del lingote sellado con arcilla en el horno a 780°C durante 48 horas.	105
III. 4.- Forja en caliente del lingote de acero de Damasco.	106
III.4.a.- Desbaste en martillo pilón neumático.	108
III.4.b.- Desbaste por laminación manual artesanal.	109
III.4.c.- Forja por martillado en el yunque.	111
III. 5.- Temple en distintos medios.	114
III. 6.- Desbaste y pulido de las hojas de acero obtenidas.	117
III. 7.- Ataque químico opcional para revelar la estructura de bandas de carburos de hierro.	117
III. 8.- Técnicas de observación metalográfica.	123
III.8.a.- Corte de las muestras y preparación metalográfica	123
III.8.b.- Microscopia óptica convencional.	125
III.8.c.- Microscopia electrónica de barrido.	126
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	128
IV. 1.- Obtención del acero base por fusión del hierro ARMCO y aleantes.	128
IV.1.a.- Acero de Damasco por fusión directa y colada.	128
IV.1.b.- Acero suave por fusión directa y colada.	132
IV.1.c.- Recocido a alta temperatura y enfriamiento lento del acero de Damasco.	133
IV. 2.- Tratamiento térmico de carburización a alta temperatura en crisol cerrado, con carbón vegetal.	138
IV. 3.- Tratamiento térmico de recocido de ablandamiento del acero por decarburización o globulización parcial de la cementita primaria.	143
IV. 4.- Forja en caliente a la temperatura adecuada.	150

índice	página
IV. 5.- Operación de temple.	178
IV. 6.- Acicalado final: desbaste, pulido y ataque químico.	182
V. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	183
VI. <u>CONCLUSIONES</u>	215
VII. <u>APÉNDICE</u>	217
VIII. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	260

I. INTRODUCCIÓN

Acero de Damasco (Damascus Steel) es un término dado a este tipo de acero al crisol, de muy alto contenido en carbono forjado en caliente, con el que se toparon los cruzados en Palestina, en forma de armas de excelentes cualidades mecánicas y una belleza incomparable. Espadas, escudos, puntas de lanza y de flechas, espejos, instrumentos quirúrgicos, etc., se hacían con este acero, en el mundo islámico medieval. Los cruzados en Palestina le comenzaron a llamar acero de Damasco. Fue afortunado el nombre, ya que se extendió su fama y su nueva denominación como acero de Damasco. Es cierto que Damasco fue una encrucijada de rutas caravaneras y constituyó un punto estratégico en la comercialización de objetos fabricados con este acero. Sin embargo, acero de Damasco no ha sido siempre la denominación de este acero, y menos, en el mundo islámico. Es importante conocer el nombre del acero de Damasco en su denominación árabe, ya que las únicas y excelentes crónicas medievales y modernas que dan noticia de él y describen, en algunos casos, la técnica de su fabricación, son y están en árabe.

Si es interesante seguir la pista de las distintas denominaciones en el mundo islámico, más lo es hacerlo si nos referimos a Al Andalus, en el extremo occidental del imperio musulmán. La homogeneidad es tal en el Islam que los términos árabes para nombrar al acero de Damasco son iguales en todas las localizaciones del imperio islámico.

En el mundo árabe, el término genérico para todas las aleaciones hierro-carbono es hadid; mientras que, para el acero de Damasco utilizan el término al-hind, recordando en la denominación la procedencia de la India de los lingotes de acero con los que se fabricaba el Damasco. Otras denominaciones de los cronistas árabes medievales son al-hindi y, también, hadid al-hindi (acero de la India). Para los cronistas árabes, acero de la India es sinónimo de acero al crisol. Otra denominación de este acero de la India (hadid al-hindi), acero al crisol, etc., es de origen persa: fulladh. En todos los casos tiene un significado concreto de acero de gran calidad, y su referencia a la procedencia hindú, se debe a la gran importancia del hierro y el acero de este país, por parte del mundo persa y árabe, con el que ellos obtenían el acero de Damasco para la forja de sus armas.

El acero de Damasco sigue siendo, actualmente, la leyenda y la estrella de los aceros de armas blancas, tanto antiguas como medievales y modernas. No sólo sus características mecánicas, de gran tenacidad y filo cortante, muy resistente al desgaste, le han hecho célebre, si no también, la cualidad añadida de su increíble belleza, proporcionada por las vetas sinuosas en tonos claros y oscuros que recorren la superficie de las hojas aceradas, forjadas con él. Estas bandas serpenteantes son las que todavía asombran por su belleza (Figura.1, 2 y 3), y que han hecho que, en la actualidad y en el pasado, se las imite por diferentes procedimientos de forja, en un mercado fantástico de los falso, que utiliza las palabras: Damasco, damasquinado, legítimo Damasco, etc., en una feria de la confusión increíble y muy rentable debida a la fama del verdadero acero de Damasco (Figura.4 y 5).

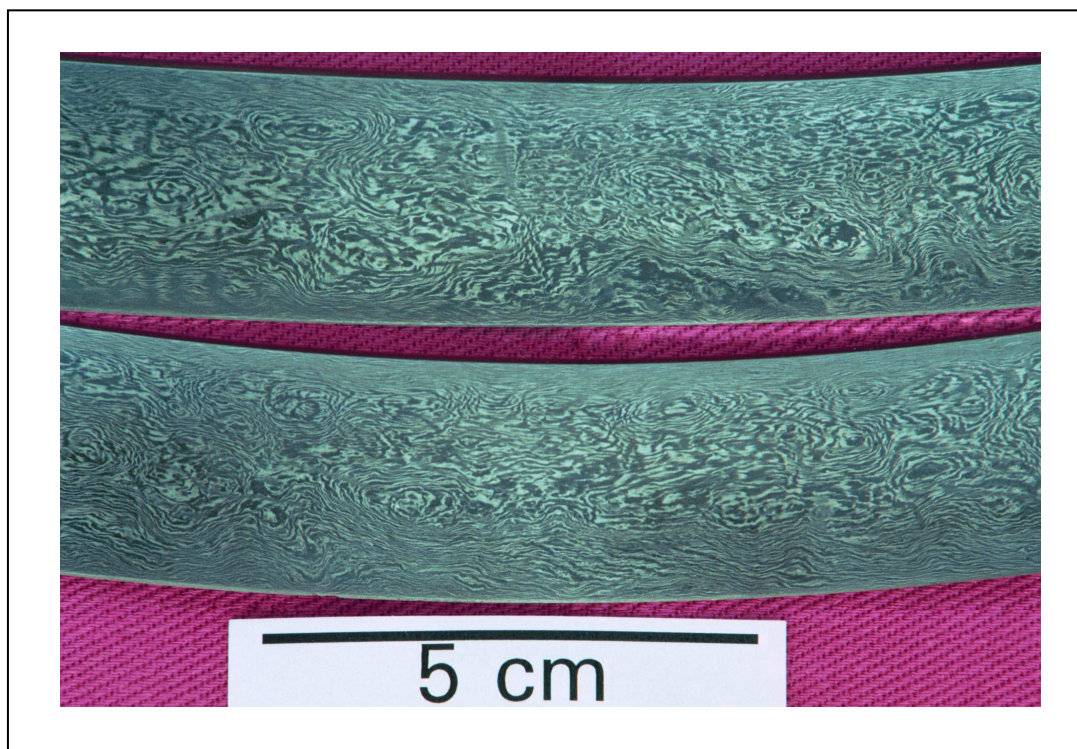


Figura.1: Imagen del shamshir de Mehemet Alí (Museo de Ejército, Toledo (España)) en el que se observan con claridad las vetas sinuosas del legítimo acero de Damasco.

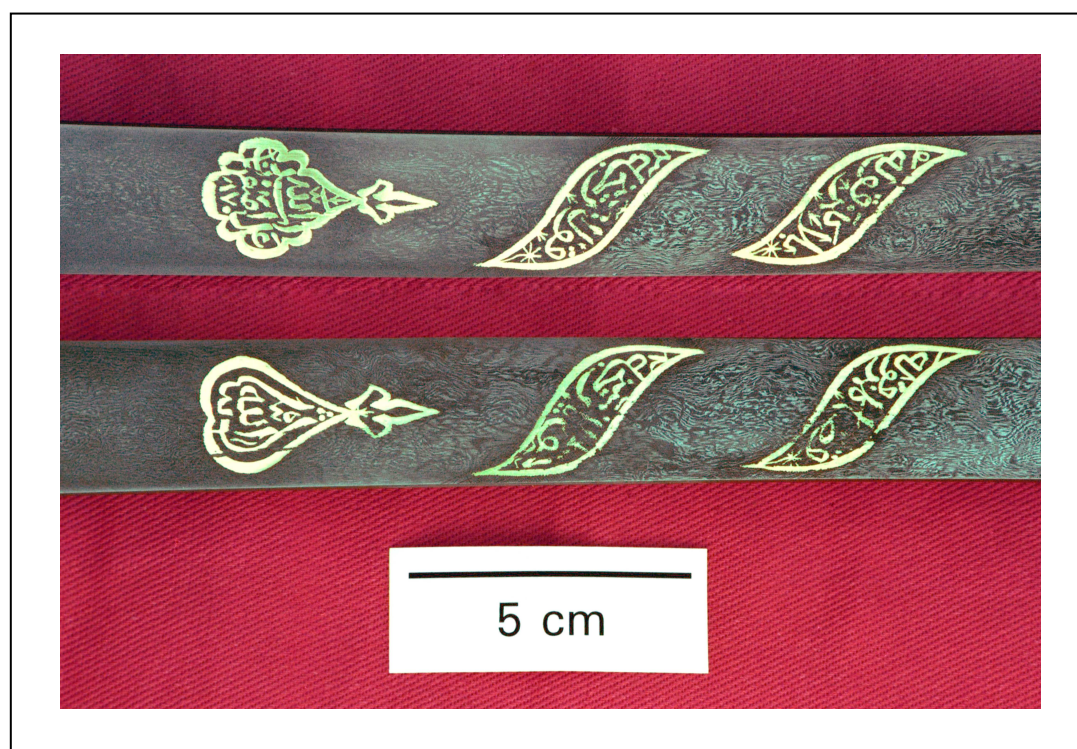


Figura.2: Imagen del shamshir de Mehemet Alí (Museo del Ejército, Toledo (España)) en el que se observan, con detalle, las vetas sinuosas junto con los nihelados en oro del maestro Assad Allâh.



Figura.3: Conjunto del shamshir y funda del sable de Mehemet Alí (Museo del Ejército, Toledo (España)).



Figura.4: Daga del ejército imperial ruso (siglo XIX). Se observan las aguas obtenidas al forjar conjuntamente numerosas láminas de aceros de composiciones muy diferentes. Se denomina acero de Damasco soldado (Damascus Steel Welded).



Figura.5: Detalle de la daga de la Figura.4.

En realidad, estos aceros, que se comercializan ahora y antes de forma masiva, son Damascos soldados (Damascus steel welded), obtenidos por forja conjunta en caliente, de numerosas hojas de aceros de composiciones muy diferentes ^[1-2] (Figura.4 y 5). Algunas de las piezas (cuchillos, navajas, dagas, navajas de afeitar, etc.) que se comercializan, hoy en día, sobrepasan el centenar de láminas. Pero nada más lejos del legítimo acero de Damasco, que es un acero único, de contenidos en carbono, que oscilan de una pieza a otra, desde el 1´4% al 1´9%, de carbono en masa; siendo los más numerosos los que se sitúan en el intervalo (1´7-1´8)% de carbono en masa.

No extraña nada que se pretenda dar el cambiazo de un acero por el otro, es decir, del Damasco soldado (Damascos steel welded) por el legítimo acero de Damasco (Damascus steel). Y es que conseguir la forja y la estética de los legítimos aceros de Damasco sigue siendo una tarea muy difícil de llevar a cabo, como veremos en nuestra investigación. La forja del legítimo acero de Damasco, es ya sólo un recuerdo en el primer tercio del siglo XIX, en el mundo musulmán: Persia, Irak, Siria, etc., como comprueba el célebre viajero Domingo Badía (Alí Bey) durante su visita a Siria, entre los años 1806 y 1807 ^[3] (Figura.6): *“También los armeros forman un ramo considerable de la industria del país, aunque existe ya la célebre manufactura de los sables damasquinaos. El temple de los que al presente se fabrican no es superior al de los demás sables de Turquía (Damascos steel welded)(...). Los sables de la antigua fábrica pasan de mano en mano y se miran como cosa preciosa; por consiguiente, el precio es exorbitante, y depende enteramente del capricho. Después de estos sables antiguos, los más estimados son los de la fábrica de Korassan en Persia”*.



Figura.6: Domingo Badía vestido como Alí Bey.
Grabado de Doménech Badía.

I. 1.- Investigación Histórica

Para nuestra investigación sobre la fabricación y forja de los aceros de Damasco, hemos elegido a la mejor firma o cuño, de entre los maestros herreros que se distinguieron en el pasado, por obtener los mejores y más bellos ejemplares. Sin lugar a dudas este personaje es el shamshirsaz Assad Allah de Isfahân en Persia. Los museos de mayor prestigio se ufanan de tener alguno o más ejemplares de este mítico maestro herrero: Metropolitan Museum de New York, Historisches Museum Bern, Solar Jung Museum Secunderabad, Benaki Museum (Atenas), Victoria and Albert Museum (Londres), Prince of Wales Museum (Bombay), Art Gallery (Glasgow), Livrustkammaren (Estocolmo), Topkapı Sarayı Museum (Estambul), Wallace Collection (Londres), British Museum (Londres), Museum für Deutsche Geschichte (Berlín), National Museum (Helsinki), National Museum (Copenhague), Museo del Ejército (Toledo, España), etc.

Mediante el estudio de algunos sables y shamshires persas de este autor se ha pretendido profundizar en las claves metalúrgicas que hicieron de Assad Allah un nombre del máximo prestigio como maestro espadero.

I. 1.a.- Reseña Histórica de Assad Allah al-Isfahaní

Haciendo una reseña histórica del mítico armero, del que Mayer ^[4] dice: “(...) *by general consent of Eastern and Western opinion, the finest of all Persian swordsmiths.*”, es bastante dificultoso adscribirlo a una época concreta.

La tradición histórica ha encuadrado cronológicamente a nuestro maestro armero dentro del reinado de Shâh Abbâs I de Persia, que gobernó entre los años 1587 y 1629 de nuestro calendario, que perteneció a la dinastía de los safawíes.

Según la tradición, Lambton comenta una anécdota al respecto ^[5], según la cual el Sultán otomano enseñó a Shâh Abbas I un yelmo (casco) de acero y ofreció una buena recompensa a quién pudiera partirlo en dos con una espada. Nuestro maestro armero Assad Allâh de Isfahân, ciudad convertida por el Shâh en la capital de su reino, fabricó una espada (shamshir) con la que logró cortar en dos el yelmo. Como recompensa, Shâh Abbâs I, liberó de impuestos a todos los fabricantes de espadas, que en esos momentos en Isfahân eran muchos y los más reputados del mundo musulmán.

No habría problema en aceptar esta noticia, a pesar de la vaguedad con que se presenta a nuestro armero, de no ser porque se conocen armas con la firma de Assad Allâh en un periodo de tiempo que abarca cuatro siglos. Mayer ^[4], en 1962, señaló que el arma más antigua conocida de nuestro maestro armero está fechada en 811 H (principios del siglo XV según nuestro calendario) y, la más reciente, en 1808 d.C.

Puede pensarse, de manera razonable, que todas las armas firmadas por Assad Allâh, a partir de la segunda mitad del siglo XVII, fecha en la que parece improbable que aún viviera el maestro armero Assad Allâh que trabajó para Shâh Abbâs I, o bien son falsificaciones, o bien, para entonces, la firma Assad Allâh al-Isfahaní no se correspondía con un personaje histórico concreto y, en cambio, sí con una marca de taller armero.

Pero, ¿qué ocurre con las espadas firmadas y fechadas con anterioridad? En nuestra opinión personal, si existió un shamshirsaz con ese nombre, y no hay por qué dudarlo, tendría que haber vivido como muy tarde a comienzos del siglo IX H, y habría creado un estilo propio para la fabricación de espadas y fundado, consecuentemente, una escuela, que sobrevivió hasta principios del siglo XIX d.C. Por lo tanto, el herrero Assad Allâh, que vivió en tiempos de Shâh Abbâs I, podría ser un descendiente del fundador y maestro y, en esos tiempos, era el jefe o titular del taller.

Los magníficos trabajos en acero de Damasco de Assad Allâh, y su escuela posterior, han sido los que hemos estudiado con el objetivo de descubrir las claves metalúrgicas de tan notables ejemplares.

I. 1.b.- Arqueometría y Arqueometalurgia

Nuestra investigación se enmarca dentro del campo de la Arqueometría y, más concretamente, de la Arqueometalurgia o metalurgia antigua (Paleometalurgia). Esta disciplina, a caballo entre la historia y la ciencia, se ocupa del estudio de todo tipo de piezas arqueológicas de naturaleza metálica, desde sus características macroscópicas a sus estructuras microscópicas, aportando información tanto de los procesos de minería como de los de extracción del metal, moldeo y conformación plástica; sin olvidar los niveles tecnológicos que alcanzaron los diferentes pueblos para transformar la materia prima en objetos útiles para diferentes usos.

Según Mohen ^[6], la metalurgia es la manifestación más avanzada en el conocimiento de los recursos naturales. En nuestra opinión, ésto ha seguido siendo así hasta el siglo XX, en el que la aparición de tecnologías muy complejas, como la electrónica y otras, compiten con la sofisticación actual de la fabricación de materiales metálicos.

La importancia de los metales fue y sigue siendo tal, que la Historia de la Humanidad se dividió en etapas asociadas a los metales. Así, el filósofo y atomista romano, Tito Lucrecio Caro (siglo I a.C.), en su obra titulada “De rerum natura”, divide la Historia de la Humanidad en tres etapas, cada una designada por un metal: el oro, el bronce y el hierro. De la misma manera, desde principios del siglo XIX, los arqueólogos daneses, entre los cuales cabe citar a Christian Thomsen Jürgensen como el más destacado ^[7], elaboraron un sistema tripartito parecido al de Lucrecio. Denominaron las distintas etapas de la Humanidad de la siguiente forma: primero una Edad de la Piedra, al final de la cual aparecen el oro y el cobre; después una Edad del Bronce y, posteriormente, una Edad del Hierro. Esto se aplicó a la clasificación de las colecciones del nuevo Museo nacional de Dinamarca de Copenhague. A partir de esos momentos se generalizó este sistema de clasificación. Queda claro que los metales son protagonistas de las diferentes etapas de existencia de la Humanidad hasta la aparición del petróleo. Su importancia ha sido tal que reinos, imperios y naciones se han movido hasta hoy sobre objetivos socioeconómicos, políticos y militares basados en la posesión de los metales: su control, su extracción y fabricación, los circuitos económicos, el armamento, los útiles, las monedas,...

Los metales y aleaciones son auténticos testigos y vectores de información privilegiados para el conocimiento de hechos acaecidos en tiempos prehistóricos e históricos, y herramientas científicas irrefutables e indispensables para el arqueólogo e historiador en la construcción razonada de la Historia. La Arqueometalurgia es la “Arqueometría del Metal”. Se trata de una ciencia joven pero con una contrastada experiencia. Los trabajos de laboratorio son ya clásicos en el estudio de la Arqueometalurgia. Su avance es imparable y se refuerza cada vez más, ya que las hipótesis son contrastadas experimentalmente y, los métodos de análisis y estudio, posibilitan la comparación científica de los resultados. La síntesis arqueometalúrgica debe hacerse teniendo en cuenta multitud de datos. Éstos se reflejan, finalmente, en una interpretación de la Historia de una manera más objetiva y enriquecedora de los hechos acaecidos a los seres humanos desde la más remota antigüedad.

Como en todas las ciencias experimentales, también en la Arqueometalurgia hay dos maneras de actuación, una más tecnológica y otra más científica. La primera se limita a realizar análisis fisicoquímicos, identificación de derrames, escorias, lingotes, moldes, estudios de minería, metalurgia extractiva y procesos de fabricación de metales y aleaciones, moldeo, forja, etc. En cambio, la actuación más científica, investiga vectores para poder interpretar a través de los análisis químicos, metalográficos y mecánicos, una información más allá de la tecnológica. Estos deben servir como testigos inequívocos y eficaces de lo que ocurrió, aportando una información muy sutil que nos permitirá llegar un paso más allá. En nuestro caso, con los estudios de los aceros de Damasco del taller de Assad Allah, nos ha permitido averiguar detalles de vital importancia, que nos han ayudado a conocer cuál fue exactamente el proceso de actuación de estos herreros, desde la fabricación del acero hasta el resultado final en forma de un bellísimo shamshir con una superficie erizada de líneas claras y oscuras de gran belleza estética y formal.

I. 1.c.- Arqueometalurgia Experimental

Algo que es muy apreciado en la actualidad, dentro de la investigación arqueometalúrgica es, la Arqueometalurgia Experimental. Se trata, después de un estudio concienzudo previo, en la búsqueda de todos los datos científicos y tecnológicos sobre las piezas arqueológicas metálicas, proponer una posible hipótesis y, a continuación, tratar de reproducir el proceso antiguo para llegar a un objeto con las mismas características que las arqueológicas.

En nuestro caso, hemos estudiado todas las pistas posibles que nos proporcionan las piezas arqueológicas para poder proponer todo el proceso metalúrgico para la fabricación de los shamshires del taller de Assad Allâh. Se ha tratado de encontrar claves del método de obtención de los lingotes de acero indio, de la microestructura de partida para la forja, tratamientos térmicos de acondicionamiento de los lingotes y temperaturas de forja. Se han podido encontrar esas claves, valorarlas y, finalmente, teniéndolas en cuenta, forjar algunos cuchillos en acero de Damasco, según la técnica empleada por el taller de Assad Allâh. Hemos podido encontrar, además, claves muy útiles a través de los análisis químicos.

Con todos estos conocimientos ha sido posible la fabricación de armas con acero de Damasco con resultados positivos.

I. 1.d.- El Legítimo Acero de Damasco del Taller de Assad Allâh: Eficacia y Belleza

Los aceros más prestigiosos, utilizados a lo largo de la Historia de la Humanidad para la fabricación de armas blancas, son: el acero de las katanas japonesas, el acero de Toledo, los aceros damasquinados soldados (kris malayo, espadas rusas, turcas, hindúes, etc.), el acero franco y el acero de Damasco (ginetas, shamshires, ...). Todos de una gran calidad, diseñados para estilos y filosofías de combate muy diferentes. Sin embargo, si hay uno que sobresale de todos y se convierte en el más deseado por museos y coleccionistas es el misterioso y bello acero de Damasco (Figura.7-30).

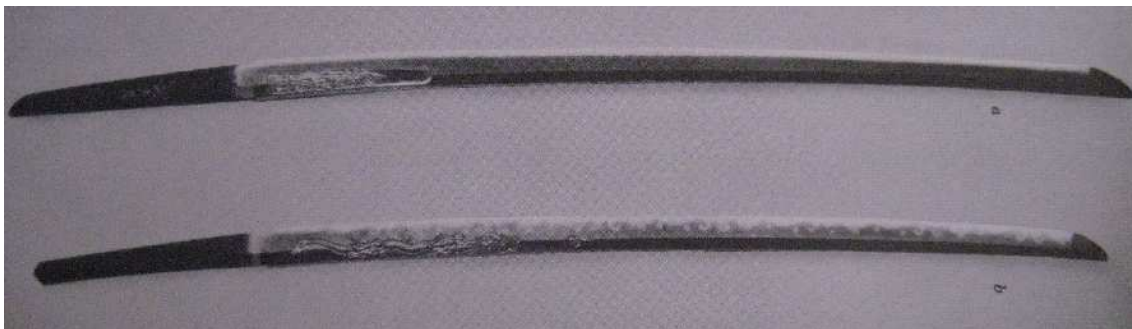


Figura.7: Dos katanas japonesas. La katana (a) maestro Mioju Umetada (1632) y (b), maestro Hankei Noda (1646) [Victoria and Albert Museum].



Figura.8: Kris Malayo (siglo XIX) [Museo Naval de Madrid].



Figura.9: Detalle del Kris Malayo de la figura anterior mostrando la parte adyacente a la empuñadura.



Figura.10: Detalle del Kris Malayo de la figura.8 mostrando la parte central de la hoja.



Figura.11: Detalle del Kris Malayo de la figura.8 mostrando la parte final de la hoja.

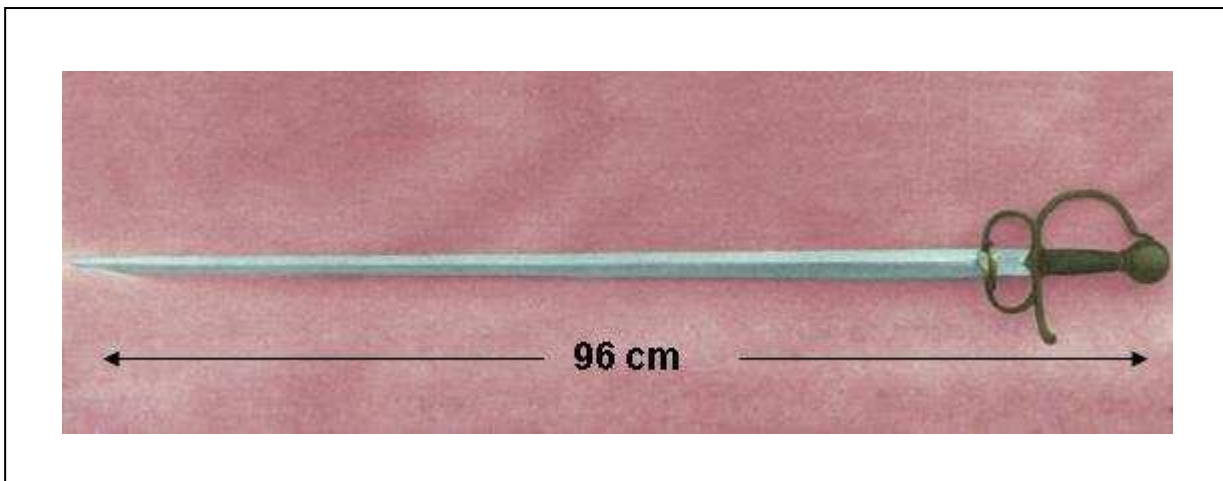


Figura.12: Dibujo a escala coloreado de la espada de Carlos V en acero de Toledo.

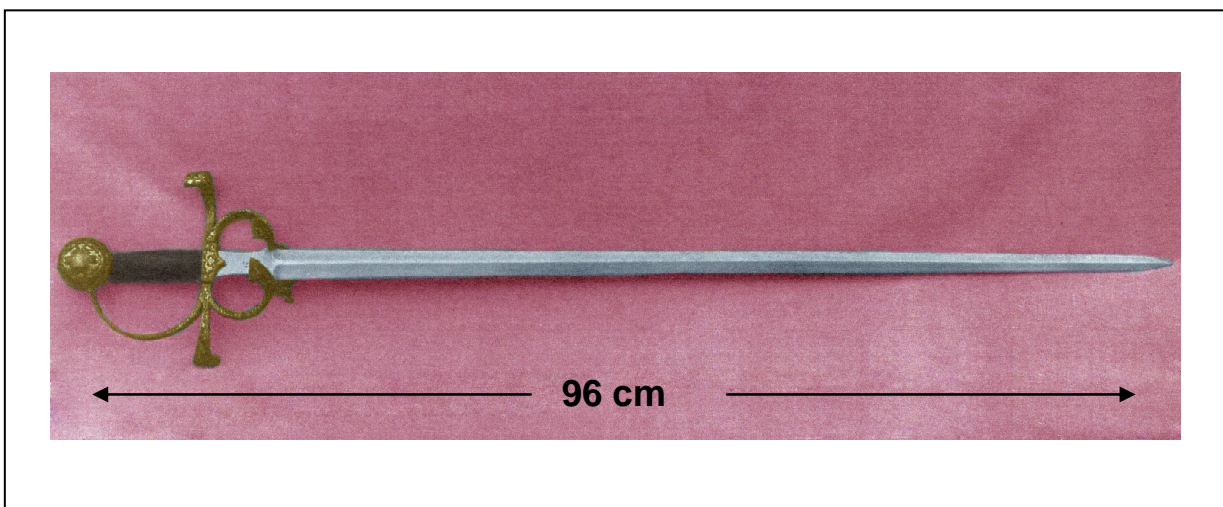


Figura.13: Dibujo a escala coloreado de la espada de Francisco Pizarro en acero de Toledo.

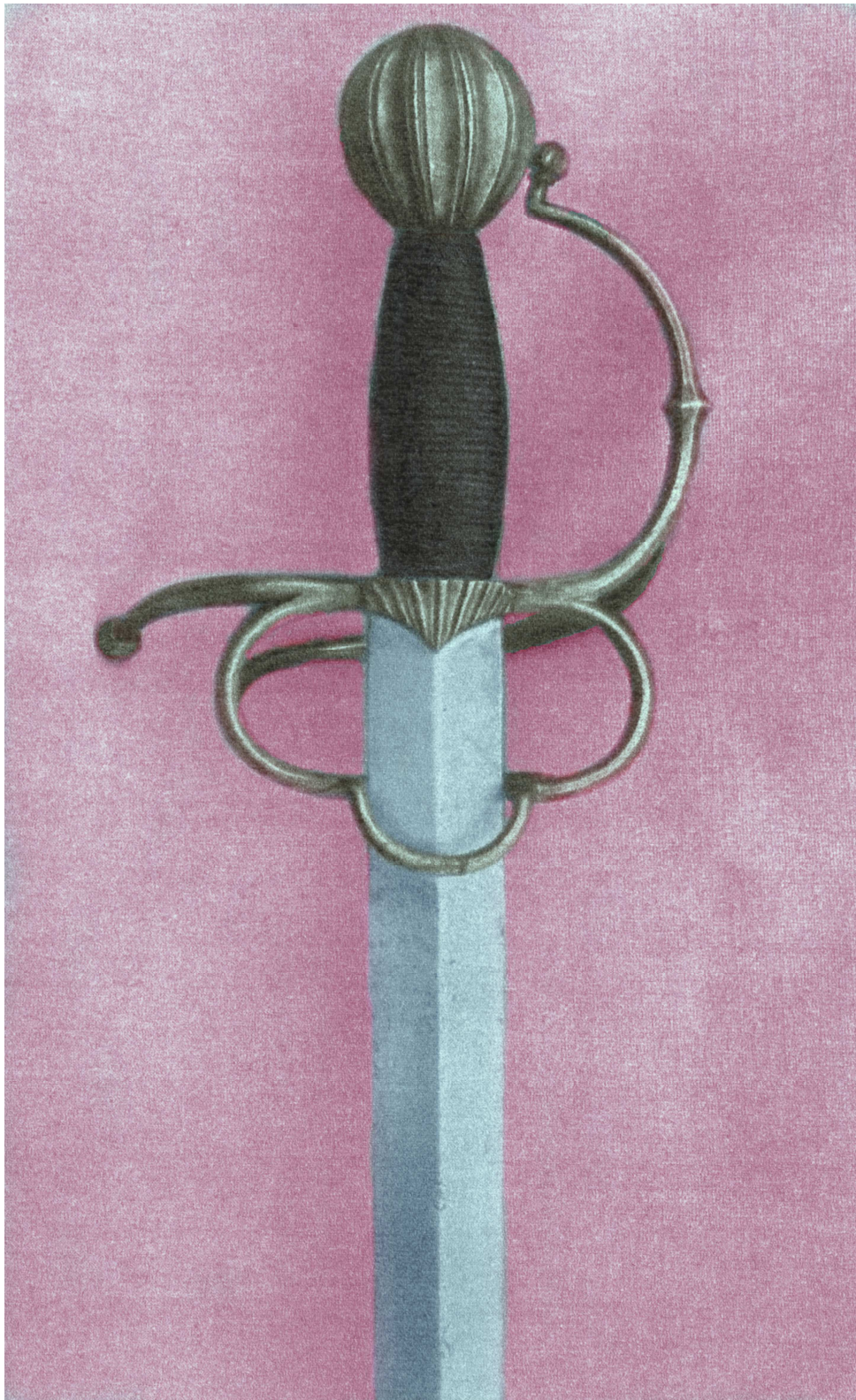


Figura.14: Dibujo a escala coloreado de la espada de Hernán Cortés en acero de Toledo.



Figura.15: Empuñaduras de espadas de acero de Toledo del siglo XVII-XVIII [Museo Valencia de Don Juan].

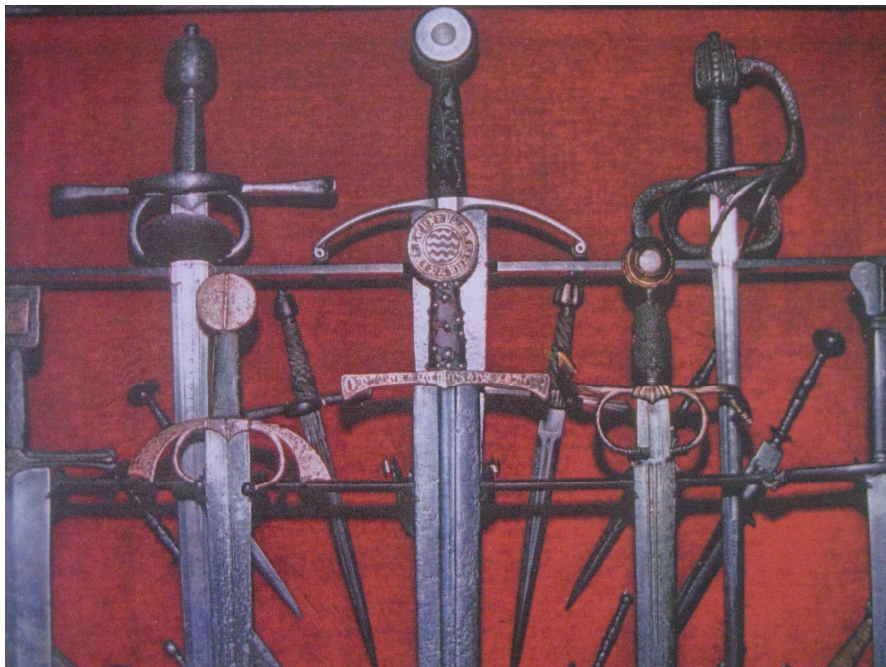


Figura.16: Empuñaduras de espadones de acero de Toledo del siglo XVI [Museo Valencia de Don Juan].



Figura.17: Joyosa (La Alegre), la espada de Carlomagno. Tiene un peso de 1630 gramos, una longitud de 980 milímetros, con empuñadura incluida y 51 milímetros de ancho de hoja. Esta espada se encuentra en el Museo del Louvre (Paris).



Figura.18: Detalle de la espada de Carlomagno, de la figura anterior, expuesta en el Museo del Louvre (Paris).



Figura.19: Espadas vikingas de origen franco.



Figura.20: Espada jineta nazarí (reino de Granada, siglo XV); forjada, muy posiblemente, con acero de Damasco aunque sin vetas. Su longitud total es de 97 centímetros, aproximadamente.



Figura.21: Detalle de la empuñadura de la espada anterior.

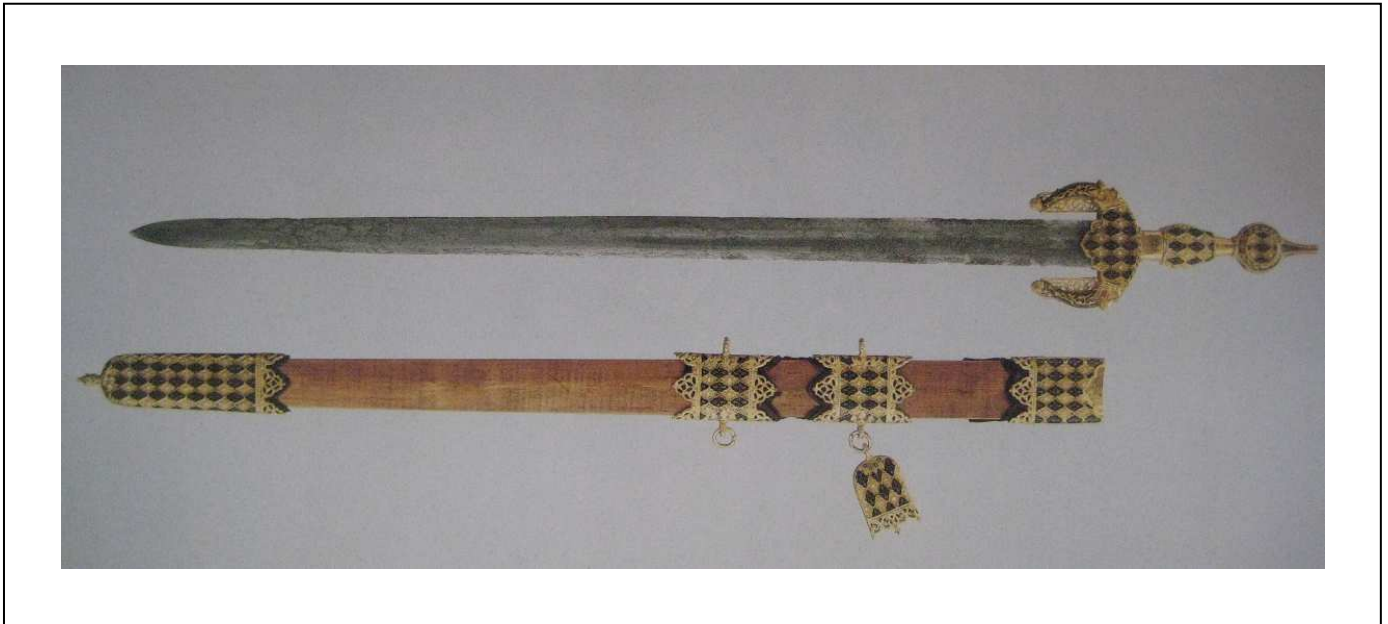


Figura.22: Espada jineta nazarí (reino de Granada, siglo XV); forjada, muy posiblemente, con acero de Damasco aunque sin vetas. Su longitud total es de 97 centímetros, aproximadamente.



Figura.23: Espada jineta nazari (reino de Granada, siglo XV); forjada, muy posiblemente, con acero de Damasco aunque sin vetas. Su longitud total es de 97 centímetros, aproximadamente.

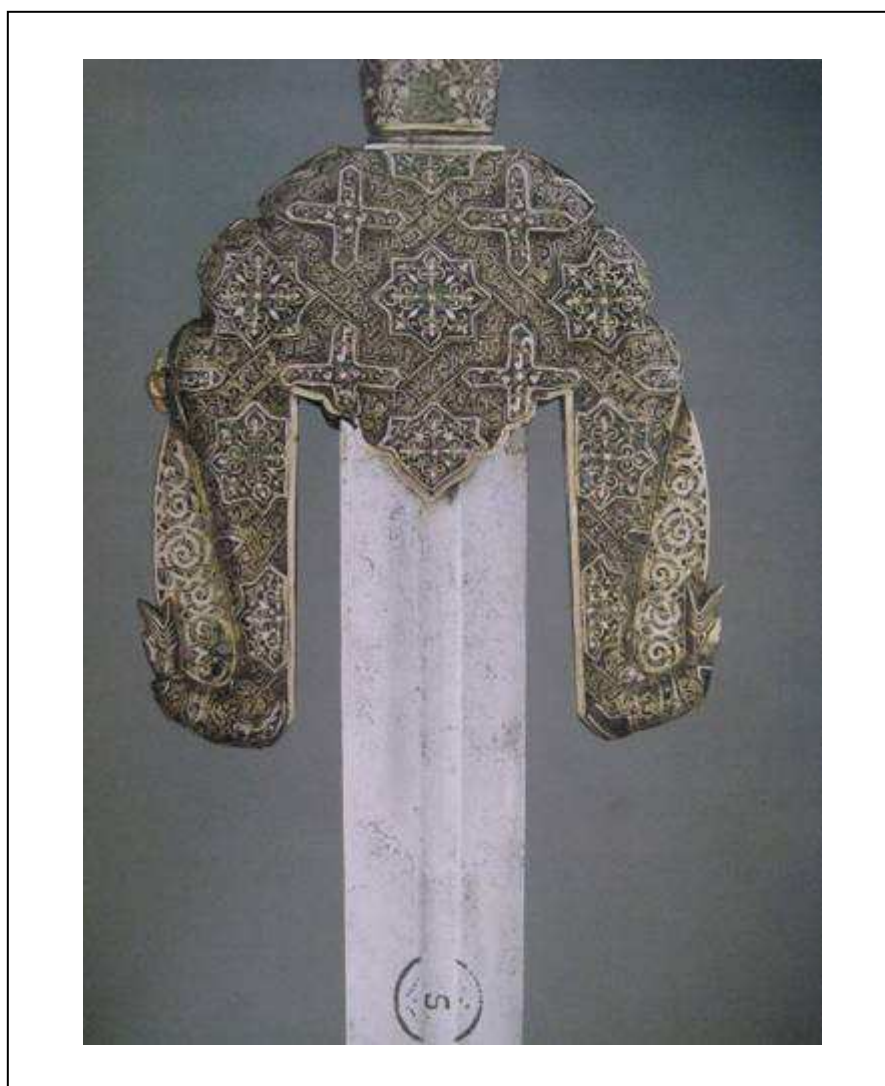


Figura.24: Detalle de la empuñadura de la espada anterior.



Figura.25: Detalle de la empuñadura de la espada anterior.



Figura.26: Cuchillo nazari (reino de Granada, siglo XV); forjada, muy posiblemente, con acero de Damasco aunque sin vetas. Su longitud total es de 35 centímetros, aproximadamente.



Figura.27: Detalle de la empuñadura del cuchillo anterior.



Maestro Assad Allah
(On Damascus Steel / L.S. Figiel, M.D.)

Figura.28: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



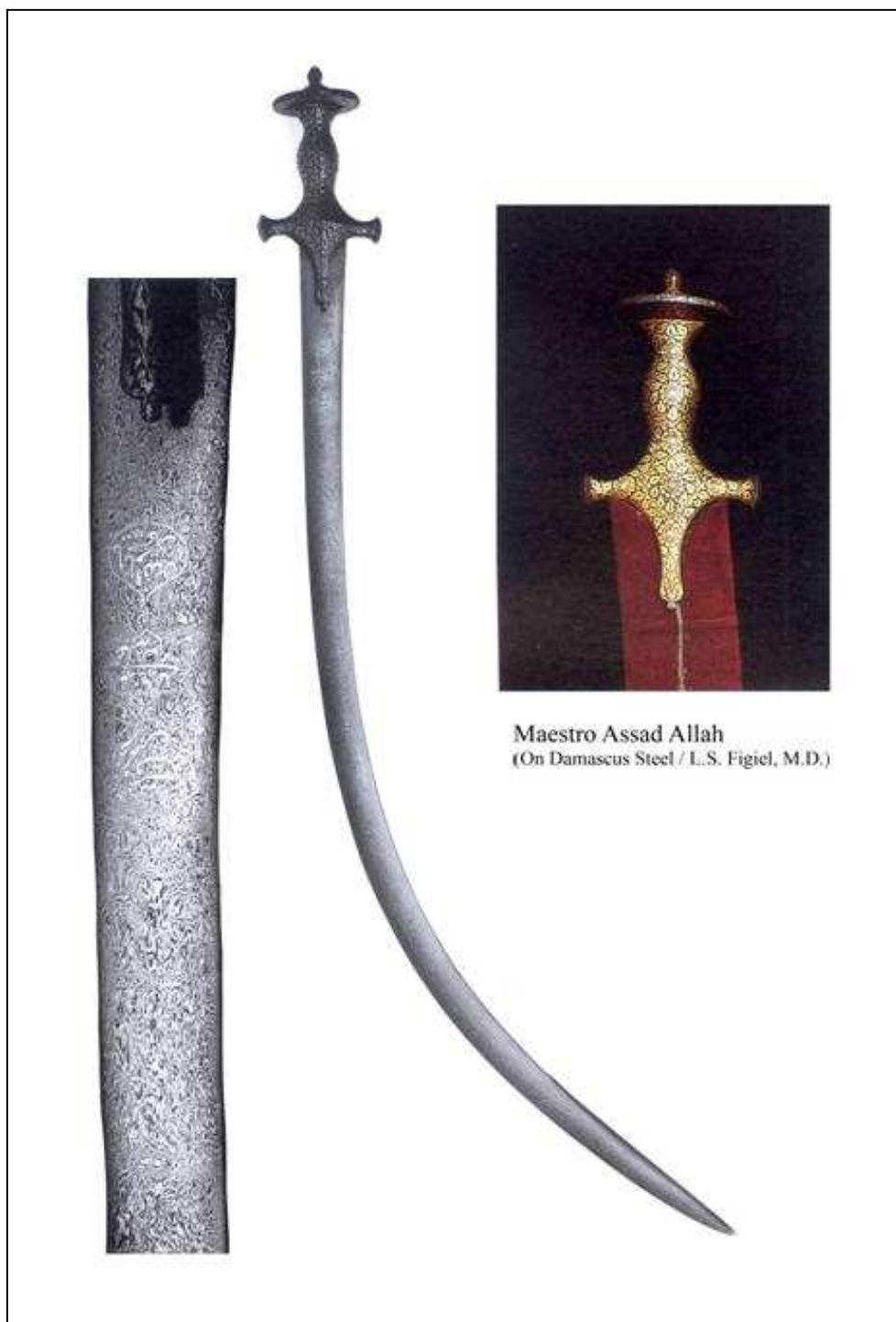
Maestro Assad Allah
(On Damascus Steel / L.S. Figiel, M.D.)

Figura.29: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



Maestro Kalb Ali
(On Damascus Steel / L.S. Figiel, M.D.)

Figura.30: Shamshir de acero de Damasco del maestro Kalb Ali.



Maestro Assad Allah
(On Damascus Steel / L.S. Figiel, M.D.)

Figura.31.: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



Figura.32.: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



Maestro Assad Allah
(On Damascus Steel / L.S. Figiel, M.D.)

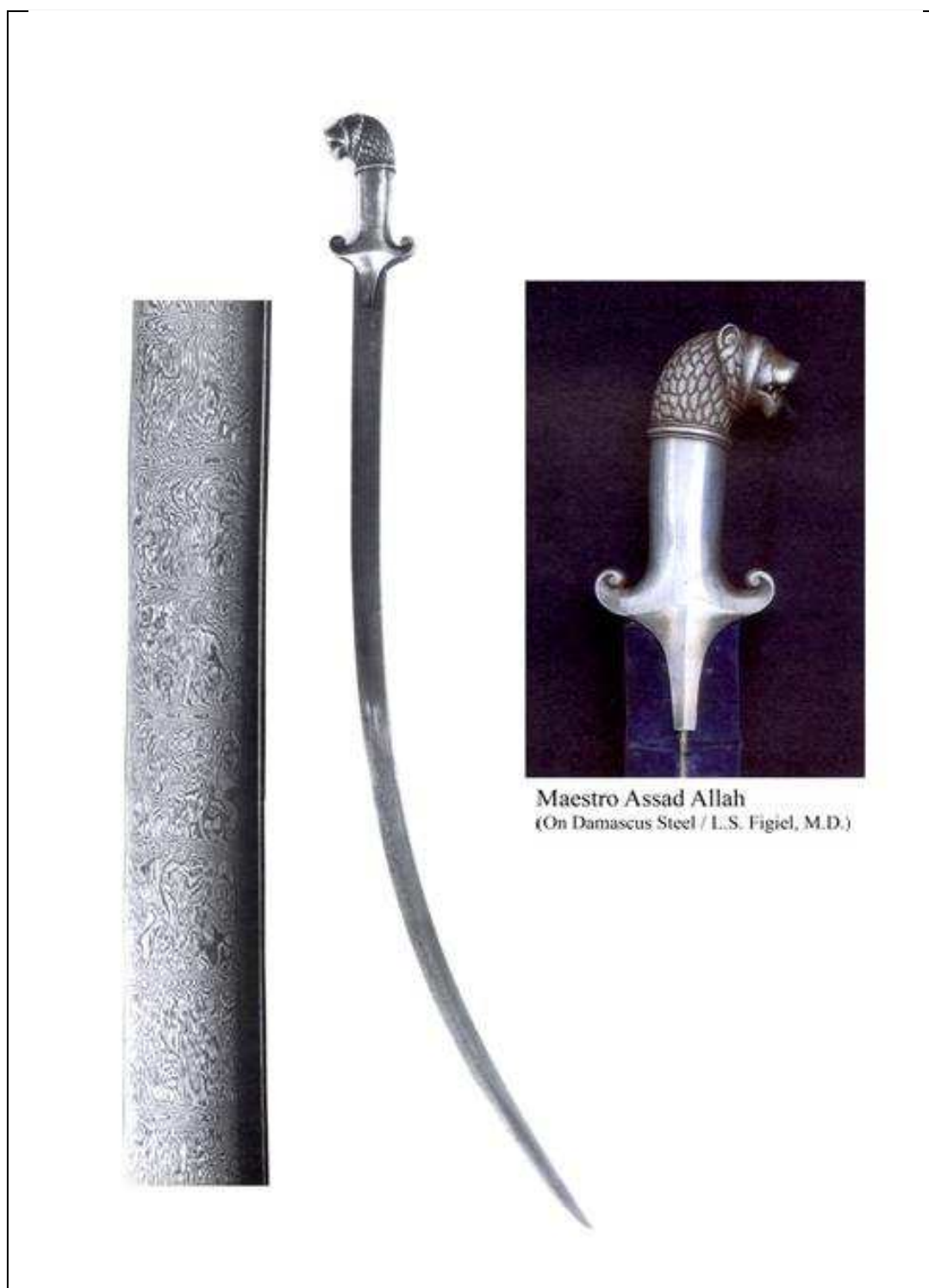
Figura.33.: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



Figura.34.: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



Figura.35: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



Maestro Assad Allah
(On Damascus Steel / L.S. Figiel, M.D.)

Figura.36.: Shamshir de acero de Damasco del maestro Assad Allâh.



Figura.37.: Shamshir de acero de Damasco del maestro Mulla Sadiq Isfahânî.



Figura.38.: Shamshir de acero de Damasco del maestro Muhammad Kazim Shirazi.

Para nuestra investigación, nos hemos centrado en las armas producidas en el taller de Assad Allah de Isfahân (Persia) por ser, con mucho, las más prestigiosas por su calidad mecánica y de diseño, así como por su incomparable estética. Los aceros de Damasco se pueden clasificar de una manera muy sencilla en dos tipos, aunque su clasificación puede ser muy variada, según numerosos autores ^[8-18], si se atiende a su forma, características mecánicas y proceso de fabricación:

1.- Genuino acero de Damasco con marcas superficiales que, a su vez, se puede clasificar, según la propuesta de Anossov ^[19,20], basada en el aspecto de las bandas superficiales en:

- a).- Damasco en bandas, en la que el dibujo se compone, fundamentalmente, de bandas rectilíneas.
- b).- Damasco ondulado, en el que las líneas rectas son más cortas y se entremezclan con otras curvadas.
- c).- Damasco ondulado, con predominio de líneas curvadas con aparición de otras quebradas y de puntos.
- d).- Damasco en red, presentando un dibujo parecido a una red, cubriendo toda la superficie como un tejido.
- e).- Damasco en escaleras, en el que la estructura en red está dividida en zonas más o menos similares.

2.- Genuino acero de Damasco sin marcas superficiales. Algunos de los aceros de Damasco con las mejores características mecánicas no poseían ningún dibujo superficial. Eran más fáciles de fabricar, ya que no tenían en cuenta las complicaciones de cuidar la aparición de las bandas superficiales.

Pues bien, los aceros de Damasco del taller de Assad Allâh en Isfahân (Persia) son en su mayoría del tipo.1, con el aspecto de las marcas superficiales, de trazado de la forma b, c y d de la clasificación de Anossov.

El haber centrado nuestra investigación en el taller de Assad Allâh, se debe a concretar el campo de estudio y centrarlo en las mejores, más eficaces y bellas de cuantas espadas se han fabricado en acero de Damasco a lo largo de la Historia.

La investigación arqueometalúrgica, la historia, la leyenda y la museografía han sido los pilares de nuestra investigación a la vez que modelo continuo de referencia y contraste en nuestros experimentos. Debe quedar claro que lo primero que se realizó fue el estudio de varios ejemplares de acero de Damasco del taller de Assad Allâh: un magnífico shamshir exhibido en el Museo del Ejército (Toledo) y otras armas de la colección de D. Jaime Brihuega (Madrid).

A continuación del estudio metalográfico de las piezas mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, y el análisis químico pertinente, se plantearon más hipótesis; teniendo en cuenta todos los datos históricos revisados, se dio paso a la experimentación y análisis de resultados.

I. 1.e.- El Shamshir de Mehemet Alí y su Historia

La pieza arqueológica museística más prestigiosa estudiada en esta investigación es el shamshir de Mehemet Alí, expuesta en el Museo del Ejército (Toledo, España), obra de Assad Allâh al-Isfahânî. Por su perfección de diseño, su calidad mecánica y su increíble belleza, se convirtió en la fuente de conocimientos más importante para desvelar los secretos metalúrgicos de la forja de estas espadas en el taller de Assad Allâh.

La historia de su existencia está a la par con su belleza increíble, su tacto misterioso y su perfecta geometría.

En la ficha documental del Museo del Ejército se reflejaba la siguiente información, antes de nuestro estudio, desconociéndose con qué acero estaba hecho el sable y quién y cuándo lo había forjado:

Planta:	Infantería
Sala:	Árabe
Nºcatálogo:	24912, Tomo I, Página 246
Nºcatálogo antiguo:	1921, Tomo IV, Página 515

Incluso había una pequeña reseña histórica:

“Que perteneció a Mehemet Alí, Bajá de Egipto. Tiene la empuñadura de asta de rinoceronte, hoja damasquinada, fabricada en el año 870 de la Hégira (1465 d.C.), y vaina de terciopelo verde con contera, boquilla y abrazadera de hierro grabado y dorado. Fue regalado por su dueño al Cónsul español en Alejandría, D. Antonio Estefani, y por éste al capitán de Artillería D. Joaquín Bouligny, quién la cedió al Museo en 1848”.

El grupo de investigación del profesor Criado ^[21] solicitó poder sacar el arma del Museo y llevarla a su laboratorio para su estudio. El permiso le fue concedido (1996) y se le realizó un primer y exhaustivo estudio en los laboratorios de la Universidad Complutense de Madrid. De este estudio y de su restauración salió abundante información sobre este precioso shamshir.

Este maravilloso shamshir (Figuras.1, 2 y 3) es un arma damasquinada de legítimo acero de Damasco, con empuñadura de asta de rinoceronte curvada hacia abajo. Esta forma de empuñadura que los árabes usaban ya en los siglos VIII al XI, aparece en Persia más tarde. Las primeras imágenes que se conocen de estas armas en Persia son de monedas de 1184-1201 d. C. ^[22].

Este shamshir tiene una longitud de 933 milímetros, un ancho en su parte central de 31´4 milímetros y un espesor de 5´95 milímetros.

La cruceta está dividida en cuatro cuadrantes con proyecciones laterales.

La hoja está protegida por una vaina de terciopelo verde con contera, boquilla y abrazadera de hierro, grabados y dorados. En ambas caras de la hoja aparecen damasquinadas en oro, leyendas coránicas cuya transcripción es la siguiente ^[21]:

1. Cara «a», orla superior «Es incuestionable Su dicho (Su palabra)»	بلا کابر قوله.
2. Cara «a», orla intermedia «El dicho es Su tiempo»	قول تاریخه.
3. Cara «a», orla inferior «Fabricada por Assad Allâh Isfahânî 870 H. (1465/1466 d.C.)»	عمل أسد الله إصفهانی ٨٧٠.
4. Cara «b», orla superior «Es incuestionable Su dicho»	قصا کابر قوله.
5. Cara «b», orla intermedia «Su tiempo es real»	حق تاریخه.
6. Cara «b», orla inferior «Si Dios quiere»	إن شاء الله.

El shamshir del que venimos hablando perteneció a Mehemet Alí (Figura. 39 y 40), quien lo encontró en algún palacio del Cairo cuando fue nombrado, por el sultán otomano, Bajá de Egipto en 1803. Anteriormente, debió pertenecer a algún sultán mameluco; ya que otro shamshir muy parecido, que se encuentra en el Museo de Arte Islámico de El Cairo, se sabe que perteneció al sultán mameluco Tumanbay. Este shamshir fue fabricado 31 años después que el de Mehemet Alí.

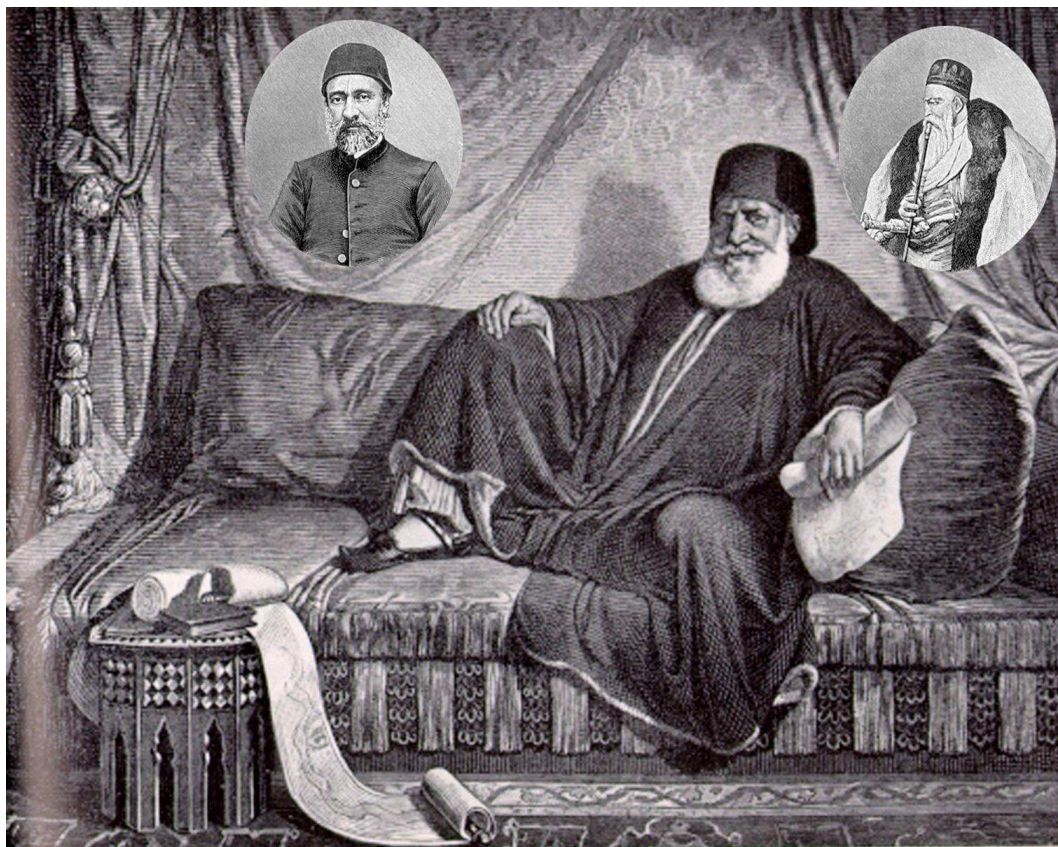


Figura.39: Grabado del sultán Mehemet Alí de Egipto.



Figura.40: Retrato al óleo sobre lienzo del sultán Mehemet Alí de Egipto, por Auguste Couder.

La presencia de asesores europeos fue constante durante el gobierno de Mehemet Alí, que fomentó las buenas relaciones con los países europeos, sobre todo, con Francia y España. Entre los asesores de los que se rodea Mehemet Alí aparece un tal Antonio Estefani que fue el destinatario del fantástico regalo de shamshir por parte de Mehemet Alí.

Antonio Estefani de Castro nació en Madrid en 1794, y fue Cónsul en Alejandría entre el 15 de Enero de 1832 y el 11 de Diciembre de 1833, que pasa a Trípoli como cónsul. A comienzos de 1834 es recibido en audiencia por Mehemet Alí y le comunica su traslado. Es en este momento cuando el shamshir pasa a pertenecer a Antonio Estefani, en agradecimiento por los servicios prestados.

En 1838, Antonio Estefani solicita y obtiene una licencia de matrimonio con Dña. Prudencia de Bouligny y Fonseca. Hay entre ambos alguna relación de parentesco, ya que un tal D. Francisco de Bouligny apoya en 1838 una solicitud de licencia de “su sobrino Antonio Estefani” dirigida en España a la Primera Secretaria del Despacho de Estado ^[21].

Así llegamos al último propietario del shamshir, el capitán de Artillería D. Joaquín Bouligny, un familiar a quien el Sr. Estefani regala en vida y que, finalmente, lo cederá al Museo del Ejército en 1848 ^[21].

I. 1.f.- La Imposibilidad de su Forja en Occidente

Nunca hasta ahora se han podido fabricar armas blancas con acero de Damasco debido a la compleja serie de tratamientos térmicos que debe sufrir el acero antes de pasar a la forja. Y, además, durante el proceso de forja en caliente, la temperatura es muy crítica, produciéndose toda esta etapa, sin sobrepasar nunca el rojo negro o rojo sangre (750°C). Algo que no cabía en la mente de los herreros occidentales, incluso de los científicos, que comenzaban siempre las etapas de forja al rojo blanco; temperatura a la cual, como se verá más adelante, este acero se desmorona como si fuera barro.

Los mejores científicos e ingenieros de los siglos XVII, XVIII y XIX, trataron de averiguar y justificar la bondad de este tipo de acero, sin llegar a aclarar su misterio [1, 2]. Ya en la segunda mitad del siglo XX, algunos científicos e ingenieros, lograron forjar estos aceros [23-50]. Sin embargo, sólo en el caso del Grupo de Investigación de Tecnología Mecánica y Arqueometalurgia de la Universidad Complutense de Madrid, se ha conseguido la forja de espadas y cuchillos en acero de Damasco, presentando las bandas características de estas armas. En los demás casos, si bien se ha conseguido su forja correcta, su aspecto externo no es el de los Damascos históricos.

Es un hecho reconocido por todos los investigadores del tema, que en la actualidad, la forja de esos aceros se ha conseguido; si bien, aún no se ha podido reproducir la belleza de los Damascos legítimos, si exceptuamos a nuestro Grupo de Investigación.

En la mayoría de los casos, pensamos que las investigaciones se han planteado mal, comenzando siempre a forjar estos aceros hipereutectoides (de muy alto contenido en carbono, del 1'4% al 2% en masa), con las precauciones necesarias para no fragilizarlos durante las etapas de calentamiento, no permitiendo la regeneración de la cementita proeutectoide continua en límites de grano. Incluso, se ha dado con el secreto inicial de forjar al principio con suma delicadeza, golpeando o laminando con pequeños esfuerzos. De esta manera se consigue triturar la cementita proeutectoide continua en límites de grano, en las superficies de la pieza trabajada; exactamente igual que se hace con los actuales aceros de herramientas aleados hipercarburados. Después, se continúa la forja de forma convencional sin calentar por encima de los 750°C para evitar la aparición, de nuevo, de la cementita continua en límites de grano.

No obstante, la mayoría de los autores, si no todos, no han considerado la trascendental importancia de las manipulaciones de estos aceros antes de tener el lingote o la pletina preparada para las operaciones de forja. Estas manipulaciones previas son:

1. – método para obtener los lingotes.
2. – tamaño de los lingotes.
3. – ciclo de enfriamiento.
4. – primer calentamiento de recocido de ablandamiento superficial del lingote antes de la forja.
5. – manipulaciones del lingote hasta llegar a la forma correcta inicial de la pletina antes de la forja.

Estas etapas son imprescindibles para llegar a obtener una pieza forjada en acero de Damasco, en toda su plenitud estética.

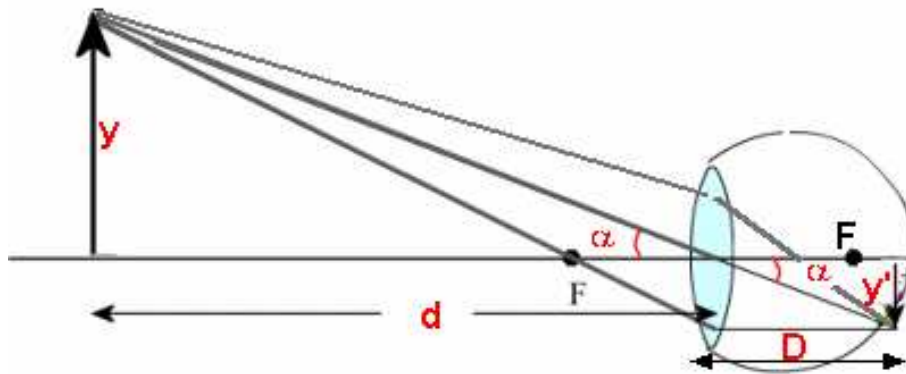
Todos estos secretos sólo se pueden extraer del estudio minucioso de las armas antiguas forjadas por los grandes maestros herreros; necesitándose, además, una aproximación exhaustiva a las fuentes escritas, donde se relatan mejor o peor las citadas operaciones. Del mismo modo, hay relatos muy interesantes de testigos viajeros y científicos del siglo XIX, y principios del XX, cuando aún quedaban algunos herreros que sabían forjar estos aceros ^[20, 51-61].

Se trata de aproximarse, al estudio y fabricación de estos aceros, desde la arqueología y la historia, para poder desarrollar hipótesis que nos lleven a la tecnología necesaria para su conformación. Saltarse esa etapa previa del estudio de ejemplares y de la revisión de la muy numerosa bibliografía y noticias sobre su fabricación desde la época medieval, puede llevar a forjar correctamente estos aceros, pero nunca, a la fabricación de piezas que presenten todos los elementos mecánicos y estéticos que los hicieron famosos.

I. 1.g.- Requisitos Ópticos que Permiten Ver las Bandas de Carburos en los Damascos

Es fundamental cuantificar, desde la óptica física, la separación y el tamaño de las bandas sinuosas de carburos de hierro de los aceros de Damasco, para supeditar los tratamientos térmicos previos a la forja y la ejecución de esta. Es un hecho que las bandas de carburos de hierro, formadas durante la forja, deben poseer unos espesores mínimos y, también, unas distancias entre ellas que nos permita visualizarlas correctamente. Otra cosa será su distribución y forma, que dependerá del gusto del experto herrero y del tipo de deformación plástica aplicada durante la forja: martillado o laminación.

Pues bien, según la óptica física, cuando miramos un objeto lo vemos siempre sobre un *ángulo aparente* (α). Este ángulo es el que forman dos rectas que partiendo del iris llegan a los extremos del objeto:



Cuanto más nos acerquemos un objeto, mayor es el ángulo aparente con el que vemos. Cuanto mayor es este ángulo, mayor es la imagen que se forma en la retina y mayor nos parece el objeto que miramos:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{d}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y'}{D}$$

El tamaño de la imagen en la retina (y') es directamente proporcional a la tangente del ángulo aparente:

$$y' = D \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

El punto hasta el que podemos acercar el objeto sin dejar de ver su *imagen nítida* y lo *más grande* posible, es el *punto próximo*; es la distancia d , unos 25 centímetros en el ojo humano normal. La distancia de la retina al cristalino, D , será de unos 2'5 centímetros. Estos datos cuantitativos debemos tenerlos en cuenta para cálculos

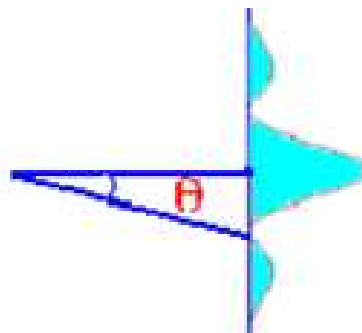
posteriores de espesores y distancias entre las bandas de carburos de los aceros de Damasco.

Otro dato importante, que nos proporciona la óptica física, es el *poder de resolución*. El ojo tiene un límite para identificar como separados dos puntos próximos. Hay que recordar que la materia está formada por una microestructura extremadamente fina, por lo que nuestro ojo al observar la materia nos ofrece un todo continuo.

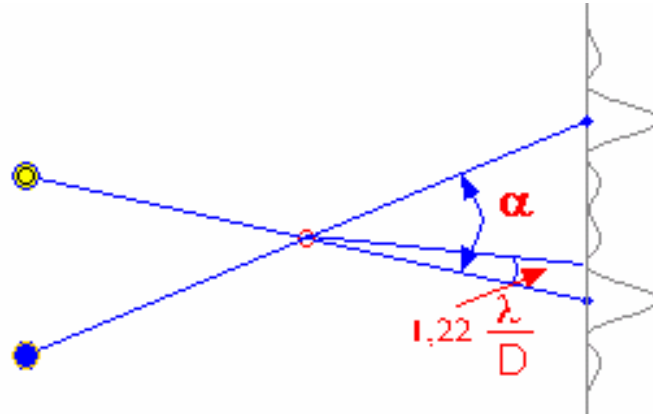
El poder de resolución se refiere a la capacidad para resolver o distinguir dos microconstituyentes de la materia u objetos que están muy próximos. Varios factores lo condicionan: el tamaño de las células de la retina, la longitud de onda de la luz y el diámetro de la pupila. La luz que llega al fondo del ojo atraviesa antes un orificio llamado pupila.

Según la óptica física, cuando un haz de luz atraviesa una ranura pequeña *se difracta* (se abre) y, colocando frente a ella una pantalla, se observan *figuras de interferencia*, en las que alguna zona queda oscura (*luz + luz = oscuridad*).

Estudiando la *figura de difracción de Fraunhofer*, producida por una *apertura circular* (orificio) sobre una pantalla situada lejos, se obtuvo una relación entre el *ángulo subtendido* desde el centro de la apertura y el primer mínimo de difracción con la longitud de onda de la luz y con el diámetro de apertura, D_a .

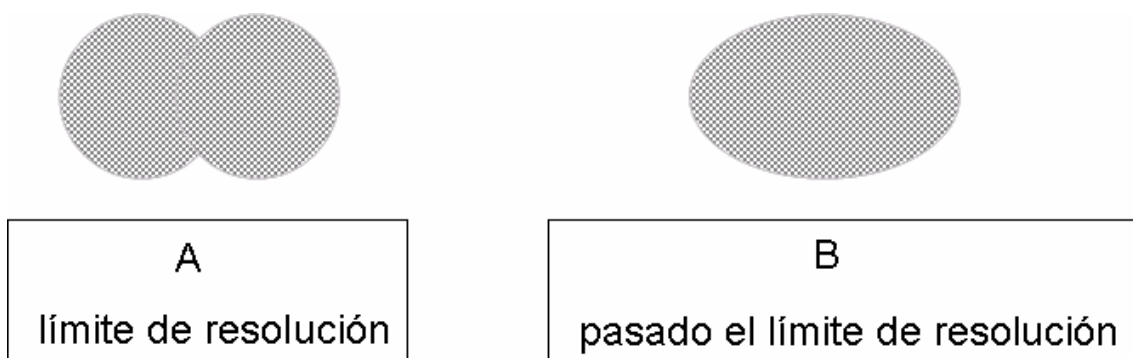


Cuando dos focos puntuales mandan su luz a través de una apertura circular originan dos diagramas de difracción. Si los puntos están separados, los diagramas se ven separados como una imagen de dos puntos diferenciados, pero si se alcanza la separación angular crítica se ven superpuestos como único punto deformado.



El *ángulo crítico* θ , es el formado por los rayos que van de la apertura al primer mínimo del diagrama de difracción y al centro del máximo.

En ese ángulo está el límite justo para la resolución (criterio de Rayleigh) y, pasado este punto, la imagen de los dos puntos se superpone:



Cuanto más pequeño sea el ángulo crítico, mayor será el poder separador del sistema óptico: más próximos podrán estar los puntos foco y, sin embargo, verlos separados. Tal y como puede deducirse de la fórmula:

$$\text{sen } \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D_a}$$

Esto se puede conseguir disminuyendo la longitud de onda o aumentando el diámetro de la apertura.

En los seres humanos, la apertura normal de la pupila es de unos 5 milímetros de diámetro (D_a). El ángulo crítico para un ojo normal lo dan el diámetro de la pupila y la longitud media de la luz visible (600nm) y tiene el siguiente valor:

$$\theta_{\text{crítico}} = 1'22 \frac{6 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 10^{-3}} = 1'46 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 5' \text{ de arco}$$

Este ángulo mínimo es el ángulo de agudeza visual de esa persona.

Cuantificando la separación mínima de los dos objetos, si se observan a una distancia de 25 centímetros:

$$\text{S.M.}_{(\text{separación mínima})} = r_{(\text{radio})} \times \text{arco}$$

$$r_{(\text{radio})} = 25 \text{ cm} = 25 \cdot 10^4 \mu\text{m}$$

$$\text{arco} = 1'46 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

$$\text{S.M.} = 25 \cdot 10^4 \mu\text{m} \times 1'46 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 36'5 \mu\text{m}$$

De esto se deduce que los espesores mínimos de las bandas de carburos y su separación, tienen un mínimo en los 36'5 μm . Este supuesto es el más favorable, ya que consideramos que la agudeza visual está en 5 minutos de arco. En realidad el ojo humano, teniendo en cuenta la separación irregular de los conos en la fovea ocular que oscila entre 1 y 5 milímetros, según su localización, para un globo ocular de 2'5 centímetros de diámetro da un ángulo de agudeza visual de 2 a 5 minutos de arco. Por lo tanto, es necesario superar los 50 μm tanto en espesor como en distancia en las bandas de carburos de los aceros de Damasco.

I. 1.h.- Espesores y Distancias Medios entre las Bandas de Carburos en las Armas de Assad Allâh

Para calcular el espesor de las bandas de carburos y su espaciado se utilizaron los sables del taller de Assad Allâh de los que tuvimos información gráfica de calidad (Figura.1, 2, 28-38). Algunos de los citados pertenecen a Kalb Alí, hijo de Assad Allâh y de otros armeros de Isfahân, de la escuela del maestro Assad Allâh: Mulla Sadig Isfahânî y Muhammad Kazim Shirazi, también de Isfahân.

La valoración del espaciado y espesores se hizo siguiendo las normas ASTM E 562-89, para el volumen de partículas y, ASTM E 112-88, para el tamaño de grano promedio. Los protocolos de estas normas se adaptaron rigurosamente a las medidas de espesores y espaciados entre bandas.

Los valores encontrados para el sable de Mehemet Alí, fabricado por Assad Allâh, dio los mayores espaciados y espesores de todos los medidos (Figura.1 y 2). El espesor y espaciado medio encontrado para este shamshir fue de 250 μm . En la zona central, el valor hallado es sustancialmente mayor, alcanzando un espesor y espaciado medio de 400 μm ; mientras que en las zonas externas, filo y costado del arma, este valor fue de 180 μm . En todos los casos, los espesores y espaciados tenían la misma magnitud.

Para los otros ejemplares estudiados (Figura. 28-38), los espaciados y espesores fueron menores llegándose, en algunos casos, a los 100 μm . Aún así, estos valores están muy por encima del valor mínimo de espesor y espaciado que exige la agudeza visual del ojo humano para ver correctamente las rectas sinuosas de carburos de hierro de estos shamshires. Esta agudeza visual, calculada anteriormente, es de 50 μm , aproximadamente.

Si se recurre a la Microscopia Electrónica de Barrido, para el caso del shamshir de Mehemet Alí, fabricado por Assad Allâh, comprobamos que el tamaño de los carburos triturados y esferoidizados durante la forja (Figura.41), que proceden de la cementita primaria, son de un tamaño inferior a 10 μm , al igual que su espaciado, provocando que nuestro ojo no los pueda ver individualizados ($10\mu\text{m} < 50 \mu\text{m}$ (agudeza visual)).

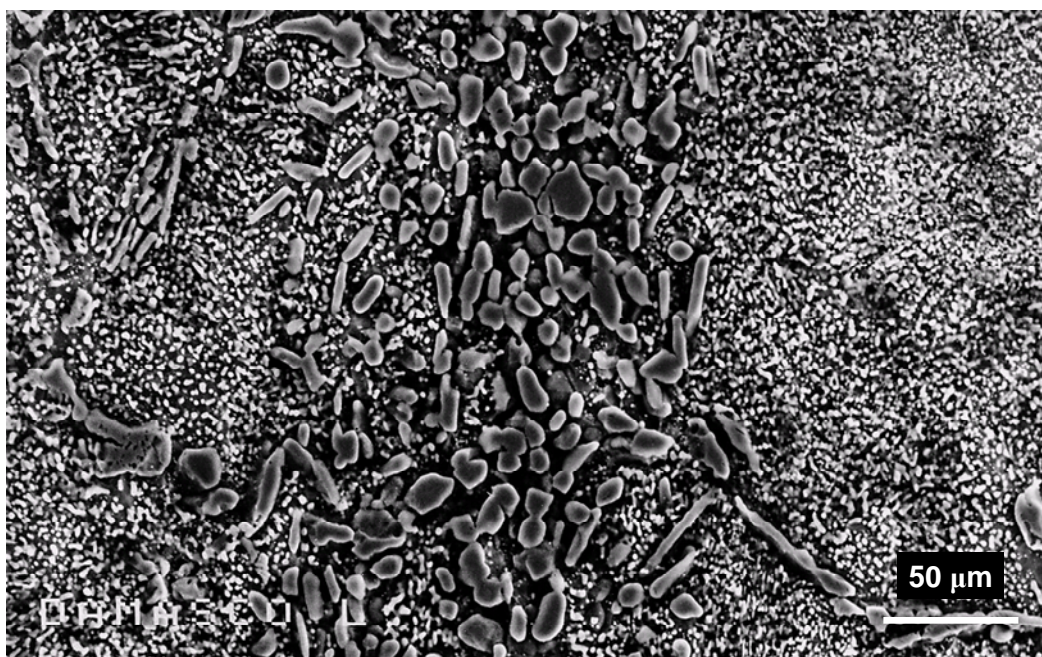


Figura.41: Imagen del shamshir de Mehemet Alí (Museo de Ejército, Toledo (España)), obtenida mediante microscopia electrónica de barrido, en la que se observa el tamaño de los carburos de hierro triturados y esferoidizados durante la forja.

Sin embargo, esa confusión hace que el ojo los reúna a unos con otros formando bandas continuas de todos ellos, y ésta es la imagen que se observa; un todo en conjunto de zonas de concentración de partículas de gran tamaño procedentes de la globulización por forja de la cementita primaria. Las partículas globulizadas más pequeñas proceden de la cementita de la matriz perlítica de estos aceros.

I. 1.i.- Las Bandas Alternadas en Tonos Claros y Oscuros; una ilusión Óptica Perseguida en el Arte.

El efecto óptico de las bandas alternadas en claro y oscuro ha sido perseguido por los maestros espaderos desde la antigüedad. No sólo en el acero de Damasco se persigue este efecto óptico hermosísimo, también lo persiguieron los maestros espaderos francos, hindúes, malayos, japoneses, etc. En la actualidad, este efecto se persigue con el *acero de Damasco soldado*, en todo el mundo, para la fabricación de armas blancas, cuchillos, navajas,...; incluso, para navajas de afeitar.

La representación pictórica de objetos, adornos, etc., ha venido siguiendo este inquietante efecto de líneas o zonas oscuras y claras, desde la Prehistoria, con sus dibujos esquemáticos de líneas claras u oscuras en campos oscuros o claros, respectivamente. Si nos ceñimos a los tiempos que van desde Apeles (352 a.C.-308 a.C.) hasta el presente, encontramos algunos datos espléndidos de la persecución de esta impresión óptica por parte de los mejores pintores. Así, filósofos como Franciscus Justinus (siglo XVII d.C.)^[62], Juan Filópono (siglo V d.C.)^[63], Longino (siglo III d.C.)^[64], Cicerón (siglo I a.C.)^[65] y Plinio (siglo I d.C.)^[66], describen la importancia en el arte de la representación pictórica, el trazo claro adyacente al trazo oscuro, que hacen resaltar al claro pareciendo tener un fuerte relieve frente al oscuro. Este efecto se puede comprobar de forma clara en las siguientes representaciones artísticas:



Meandro de los mosaicos del mausoleo de Gala Placidia en Rávena. Siglo V.



Meandro del tapiz de San Miguel. Arte alemán de la segunda mitad del siglo XII. Catedral de Halberstadt.



Moisés en el Monte Sinaí. Mosaico, h. 550. Rávena, San Vital.



Detalle de un vaso del sur de Italia. Siglo IV a.C. Copenhague, Museo Nacional, núm. Inv. 3408.

La importancia de las líneas claras que resaltan al lado de las oscuras es la base de la representación del brillo y del relieve, en toda la Historia del Arte ^[67], según el profesor Ernest H. Gombrich del Warburg Institute de la Universidad de Londres. Esa estética es la que impregna la belleza básica de las espadas de Damasco. Se trata de obtener una imagen que impresione al que la ve. El juego del claro y el oscuro, la luz y la penumbra, ha sido siempre un efecto mágico en la Historia de la Humanidad.

El prestigio de un pintor siempre estuvo al servicio de conseguir el claroscuro más determinante: Leonardo, Corregio, Ribera, Rembrandt, Vermeer, etc. En el fondo, es el juego de todos los pintores, a lo que hay que sumar el color, la línea y la perspectiva.

Al respecto del claro y el oscuro, la luz y la penumbra, el blanco y el negro, Juan Filópono ^[63] escribe:

“...Si aplicamos blanco y negro, sobre la misma superficie, y luego los contemplamos desde lejos, el blanco parecerá siempre mucho más próximo y el negro más lejano. Por lo tanto, cuando los pintores quieren que algo parezca hueco, como un pozo, una cisterna, una zanja o una cueva, lo pintan de negro o marrón. Pero cuando quieren que algo parezca prominente, como los pechos de una muchacha, una mano extendida o las patas de un caballo, aplican el negro sobre las áreas contiguas de manera que éstas parezcan retroceder y las partes que hay entre ellas adelantarse.”

Y siguiendo con el juego del resalte conseguido al alternar las zonas claras con las oscuras, como las bandas del acero de Damasco, del acero franco o del malayo, Longino escribió, en su prestigioso ensayo “Lo sublime” ^[64], lo siguiente:

“...Aunque los colores de sombra y luz se encuentran en el mismo plano, uno al lado del otro, la luz salta inmediatamente a la vista y no sólo parece sobresalir sino realmente estar más cerca.”

Vemos cómo el blanco resaltado por el negro, el claro por el oscuro, dan una visión mágica de una superficie, haciéndola parecer en relieve. Es el efecto conseguido por la alternancia de las vetas claras en el fondo oscuro de los aceros de Damasco los que han conseguido hacer espléndida la belleza de las hojas de los shamshires fabricados por el mago herrero artista Assad Allah, y tantos otros espaderos célebres.

El profesor Gombrich escribe en su libro “El legado de Apeles” ^[67]:

“...es tentador especular sobre quién originó o consolidó este longevo y poderoso idioma visual, el lenguaje de la luz y el lustre. Mi candidato para este papel no es otro que el más famoso de todos los pintores, el pintor Apeles, que vivió en la época de Alejandro Magno, al final del siglo IV a.C. (nacido en Colofón en el 352 a.C. y muerto en Cos en el 308 a.C.) ”

Es muy evidente, a lo largo de la Historia del Arte, la preciosura que emana del claro y el oscuro, y viene de algo que es natural en el ser humano, la visión de los objetos que nos rodean. El claro y el oscuro, nos ayudan a percibir el relieve y el contraste necesario para percibir las cosas con nuestro sentido de la vista. El contraste entre el claro y el oscuro, el negro y el blanco, contribuye a que nuestra agudeza visual supere la apreciación de los límites de las cosas que observa.

Como no se ha conservado ninguna obra del pintor Apeles, tenemos que recurrir a las fuentes literarias e históricas sobre él. Todas son muy claras, y hablan de los mismos hechos sin ser divergentes en ningún momento. Es fascinante recordar una anécdota que cuenta Plinio el Viejo en su Historia Natural ^[63], libro en el que se encuentra una recopilación de noticias y anécdotas sobre el famoso pintor griego. La anécdota dice así:

“...El famoso pintor Protógenes vivía en la isla de Rodas. Cuando Apeles llegó allí durante un viaje, estaba muy impaciente por ver los trabajos de un maestro del que había oído hablar tanto, de modo que se dirigió inmediatamente a su taller. No encontró a Protógenes en casa, pero vio una gran tabla en el caballete, preparada para ser pintada. Una anciana que servía a Protógenes como ama de llaves preguntó al visitante quién era: << Sólo muéstrale a tu señor esto >>, dijo Apeles, tomó un pincel y trazó una línea extremadamente fina sobre la tabla.

Cuando Protógenes volvió a casa vio la tabla e inmediatamente entendió el mensaje. El visitante tuvo que ser Apeles, pues nadie era capaz de tal perfección. Entonces tomó otro color y trazó una línea aún más fina encima de la dibujada por Apeles, y le dijo a su ama de llaves: << Si el visitante vuelve, muéstrale esto >>. Cuando volvió Apeles de nuevo, se sintió avergonzado de ser superado, y dividió la línea con un tercer color, sin dejar sitio para una línea más sutil. Protógenes admitió su derrota, corrió al puerto a abrazar al visitante y la tabla fue conservada. Más tarde estuvo expuesta en Roma en el palacio de los Césares, hasta que fue destruida en un incendio. Era muy apreciada, aunque sólo mostraba líneas visum effugientes, lo que viene a ser literalmente, que se escapaban a la vista.”

Hans Van de Waal, en 1967, escribió un artículo muy exhaustivo en el que relató no menos de treinta interpretaciones diferentes ^[68].

Volvamos, otra vez, al prestigioso profesor de Historia del Arte, E.H. Gombrich, y su hipótesis sobre el relato de Plinio:

“... Si Apeles encontró la tabla preparada y trazó sobre ella una línea fina como muestra de su habilidad natural sin par, Protógenes, al volver a su estudio, podía haberle vencido añadiendo una línea más clara para dar la apariencia de modelado por medio de la luz tangente y hacer resaltar un poco la línea. Pero cuando vino Apeles de nuevo, la biseló con una línea aún más fina, que sugería brillo y esplendor, y a esto ya no se podía añadir nada sin estropear la apariencia de línea, que había empezado a sobresalir de la tabla como arte de magia. Conocemos el relato de Plinio sobre la tabla de Roma que mostraba líneas visum effugientes. En general, esto se traduce como líneas casi invisibles, pero quizás, mi interpretación se apunte aquí un primer tanto pues, ¿no podría significar líneas que parecen retroceder a la vista ?”.

He aquí un relato histórico en el que el pintor más grande y célebre de la Historia, establece un reto con otro magnífico artista: Protógenes; para ver quién es capaz de pintar la línea más fina y cómo resaltar la del anterior. La agudeza visual puesta a prueba por dos grandes genios de la representación pictórica y el motivo más perseguido: resaltar el negro con el blanco y el blanco con el negro. Las líneas blancas y oscuras que se resaltan; el más simple motivo pictórico y el denominador común universal de las imágenes visuales.

Es claro que esta preocupación por obtener esta imagen de líneas de claro y oscuro contrapuestas, tan apreciadas por los seres humanos, se trasladó, así mismo, a la apariencia de las hojas de las espadas, proporcionándoles una belleza mágica. De esta manera, al igual que los grandes artistas como Apeles, los maestros herreros trasladaron estas imágenes a sus espadas. Con una forja complicada y difícil, muy ritualizada, los expertos armeros dibujaban en el alma de sus aceros, el reto del claro y el oscuro en forma de líneas más o menos serpenteantes, que hacían aflorar, después de un desbaste y pulido cuidadosos, con el ataque químico ácido oxidante, dando a sus hojas de fuerte acero una imagen de magia y fuerza (Figura.1).

I. 1.j.- Desde Cuándo y Donde se Forjaron Estos Aceros.

El acero de Damasco fue conocido ya unos siglos antes de Cristo. Sin embargo, las referencias a él, aún sin el prestigioso nombre de acero de Damasco, comienzan en los primeros siglos después de Cristo. La anécdota más conocida y relatada, por los historiadores griegos, sobre el acero indio (posterior materia prima de los aceros de Damasco), se encuentra en los relatos que, sobre los itinerarios bélicos de Alejandro Magno, escribieron sus contemporáneos y otros más tardíos de los siglos II y III d.C. Aunque, Calistenes de Olinto, viajó con Alejandro en casi todo su recorrido asiático, no es demasiado fiable ya que en el siglo III d.C. apareció una versión suya, del todo dudosa, de la que se dice que es de un falso Calistenes.

La mejor fuente de Alejandro es la “Anábasis de Alejandro Magno” ^[69], escrita por el griego Lucio Flavio Arriano (siglo II d.C.), discípulo de Epicteto, extraordinario historiador, excelente general de la legiones romanas (XII Fulminata y XV Apollinaris), primer cónsul de la Bética, gobernador de Capadocia y comandante de las legiones romanas en la frontera con Armenia. Después de la muerte de su protector, el emperador Adriano, se retiró a Atenas, donde fue nombrado arconte y escribió, entre otros libros, “La epopeya del genio bélico de Alejandro Magno”, con pasión, con encanto y de forma realista. Fue, sobre todo, un historiador militar, que imitó las formas de Jenofonte, discípulo de Sócrates, y de ahí le vino el apodo de Jenofonte. Para su Anábasis Alejandrina, se basó en historiadores contemporáneos de Alejandro Magno y otros más tardíos como: Calistenes, Onesicrito, Nearco y Aristóbulo I, además de en el más tardío, Clitarco de Alejandría. Es muy posible que Flavio Arriano dispusiera de la biografía de Alejandro, escrita por uno de sus mejores generales: Ptolomeo.

La noticia transmitida cuenta cómo fue vencido el rey Poros del Punjab (India) por Alejandro Magno. El comportamiento valeroso y aguerrido del gigante rey Poros (2'30 metros según algunas crónicas), hasta caer vencido sobrecoge a Alejandro. Pide a sus soldados que no le maten y lo apresen vivo. Sometido por las falanges macedonias es traído a la presencia de Alejandro. Ya en su presencia, Alejandro pregunta a Poros cómo quiere ser tratado, y éste le contesta, lacónicamente: “como un rey”. Alejandro le concede lo pedido y lo confirma como rey de su reino (Punjab), al que suma otros reinos hindúes conquistados, como súbdito del Rey de Reyes. Poros hace traer ricos presentes al macedonio y, entre los regalos más llamativos, aparece un gran cofre de oro macizo incrustado en perlas magníficas transportado a hombros por esclavos gigantes. Alejandro se queda estupefacto y, al dejar el gran cofre a sus pies, manda que lo abran para ver su contenido, que espera sea aún más increíble. Abierto el portentoso cofre de oro macizo, en su interior, se encuentran unos modestos lingotes de wootz (materia prima indú del acero de Damasco). La sorpresa es total, hasta que sus geólogos, científicos, historiadores,... que le acompañan por su expreso deseo en todas sus campañas, le explican de qué se trata.

He ahí el valor extraordinario, en aquella época, del acero indio (wootz), materia prima para forjar los famosos aceros de Damasco.

Muchas otras historias antiguas se cuentan de este magnífico acero; pero no es hasta época islámica, en la que sin perder su halo mágico, comienzan a aparecer referencias más concretas y precisas en los cronistas. Parece que en la época de

esplendor, en la fabricación de espadas con acero de Damasco, Edad Media y Moderna, esta no traspasó los límites del mundo musulmán. Su conocimiento y su fabricación se extendió con el avance de las conquistas islámicas.

El mayor prestigio en la fabricación de estas armas lo tuvo siempre Persia, que en los siglos de mayor producción, el centro más afamado para la forja de este acero fue Isfahân, que durante la dinastía safavida llegó a ser la capital del reino.

La materia prima para la forja de espadas con acero de Damasco fue, en mayor parte, acero de la India, lingotes llamados wootz (palabra inglesa que trata de imitar el sonido del sustantivo indú acero: ukku, en una mala versión).

Recorrían desde la India, en caravanas, todas las rutas que se dirigían al mundo islámico, muy especialmente a Persia. Asimismo, las naves partían desde la India y llevaban estos lingotes de acero indio al puerto de Basra (Basora), al sur de Iraq y, a través del Mar Rojo, hasta Egipto. En Egipto las caravanas lo conducían por todo el norte de África llegando a Al Andalus, en la Península Ibérica.

Este acero indio era conocido desde época clásica en Europa. Así, entre los griegos, Herodoto se refiere a él como “*hierro indio*” ^[70] y, los romanos, que lo importaban desde el siglo I, le llamaban según escribe Plinio ^[71] “*ferrum sericum*”.

El mineral de hierro es muy abundante en la India y sus minas fueron explotadas desde tiempo inmemorial. Las principales explotaciones arcaicas se sitúan en los estados actuales de Misore y Hyderabad. Además, recurrieron a la importación de minerales de hierro del África Oriental, como recoge el testimonio del geógrafo y científico árabe andalusí Abu Abd Allâh Muhammad al Idrisi ^[72], nacido en Ceuta (1100) y muerto, tal vez, en Ceuta o en Sicilia (1166), sobre la explotación y el comercio del mineral de hierro de Sofala, antigua región de la costa de África Oriental, contemporáneamente incluida en la actual Mozambique:

“...Los habitantes son pobres, miserables y sólo tienen el hierro para vivir. En efecto, existe una gran cantidad de minas de ese metal en las montañas de Sofala. Los habitantes de la Isla de Zanj (actual Zanzíbar) y de otras islas de alrededor (según los árabes las Islas de Zanj es la tierra de los negros), vienen aquí a buscar el hierro para transportarlo hacia el continente y a las islas de la India, donde lo venden a buen precio ya que es objeto de gran comercio y de gran consumo en la India. Este mineral, groseramente extraído, es expedido para la India por los mercaderes musulmanes, luego transformado en acero indio y expedido al mundo musulmán bajo su forma bruta de acero o en forma de espadas ^[72-75].

Asimismo, al Idrisi ^[72], afirma que de las minas de Malindi (en la desembocadura del río Galana en el Océano Indico, en Kenia), Mombasa (ciudad de origen árabe; es, actualmente, el principal puerto del África Oriental en el Océano Indico, en Kenia) y Sofala (Mozambique), se obtiene el hierro con el que se fabrican las espadas de la India, famosas en el mundo entero.”

De todo esto se deriva que los lingotes de acero indio (los wootz), fabricados en India, tenían ciclos de ida y vuelta. Los comerciantes árabes transportaban grandes cantidades de mineral de hierro de África, como comenta al Idrisi, de zonas próximas a la costa y, también, de zonas del interior del continente africano, como el de los Grandes

Lagos en el norte de Zambia ^[76,77]. Transformados, bien los minerales de hierro, como el propio hierro importado, los hindúes expedían sus famosos lingotes camino de China, Persia, Irak o el Mar Rojo. Naturalmente, también su propio mineral indio autóctono era transformado y comercializado, posteriormente, por caravaneros árabes a través de rutas terrestres o por rutas marinas por comerciantes iraquíes, persas e hindúes ^[78], en su mayoría.

La desaparición del Imperio Sasánida y el debilitamiento del Imperio Bizantino permitieron a los abasidas grandes posibilidades comerciales. En cuanto a los sirios, se beneficiaron del retroceso bizantino; aunque siempre se inclinaron más hacia los países mediterráneos que hacia el oriente asiático.

Las rutas de la época estaban despejadas, bien trazadas, los obstáculos salvados y, al mismo tiempo, se disponía de una posición clave respecto al gran comercio de la época. Desde época abasida se produjo un auténtico éxito económico musulmán. La intensa actividad desarrollada en las ciudades y en las rutas comerciales, la abundancia de riquezas y el total dominio del Mediterráneo y de la parte occidental del Océano Índico, siendo clave el paso de la capital del imperio musulmán a Bagdad, creó una corriente de atracción entre las dos zonas mercantiles. Esto favoreció, por una parte, la llegada de mercancías hacia Irak a través de rutas caravaneras y a su puerto de Basra (Basora) y, por otra parte, el comercio de tránsito, pues Bagdad se convirtió en centro de distribución de mercancías hacia Oriente Medio, norte de África y Al Andalus ^[79].

Desde Irak, las rutas de expedición terrestres conducían hacia Irán y Asia Central y, en otra dirección, hacia Armenia, los territorios bizantinos, Siria y Egipto. En Asia Central, antiguo centro de tránsito comercial entre el Próximo y Extremo Oriente, lugar de paso de una de las rutas de la seda, los mercaderes árabes, iraníes, turcos, chinos e hindúes, se encontraban y procedían a sus intercambios. En el Oriente Próximo, los negociantes y mercaderes árabes se relacionaban con los bizantinos y con otros procedentes de distintos puertos del Mediterráneo, especialmente, de la zona de influencia musulmana. Así, Al Andalus, estuvo enlazada siempre con las rutas comerciales de Oriente. Es posible que estos comerciantes llegaran a tener contactos con mercaderes bálticos y escandinavos. A pesar de los avatares sufridos por cambios en el mundo islámico, jamás se inclinó la balanza del lado de prohibir o entorpecer estas rutas comerciales.

En este intenso tráfico comercial, los aceros hindúes iban y venían en los barcos y las caravanas como un artículo de gran valor. Los lingotes de acero (wootz), fabricados en diversas localidades de la India, no eran transformados allí. Los objetos acabados de acero indio, principalmente cuchillos, puñales, láminas de sables, etc., eran trabajados fuera, sobre todo en Persia, país del máximo prestigio entre los pueblos orientales por su industria de forjar armas. Para este hecho y localización geográfica e histórica, existió una ruta del acero y transporte de lingotes, como hubo una ruta de la seda o de las especias. Mejor hay que decir, que existieron dos rutas: una terrestre y otra marítima. En la terrestre, el metal en bruto de gran valor era transportado a través de largos y difíciles caminos, a cargo de mercaderes persas de Isfahân. Este transporte se hacía sobre mulas, a través de las Indias Centrales: el Punjab, Khorassân y Afganistán, hacia los países del Asia Occidental, donde el metal era trabajado por forja en armas.

La región de Isfahân (Persia) fue célebre por la fabricación de sus hojas aceradas de shamshires, sables, espadas, puñales, etc., como lo atestiguan las numerosas firmas de artesanos de esa provincia en ese tipo de armas de gran calidad y diseño. Forjadas, por tanto, de forma principal en Irán, las hojas llegaban a los mercados, de los que el más importante fue Damasco. Desde allí, se redistribuía a El Cairo y Estambul, desde donde eran exportadas a África del Norte, Al Andalus, los Balcanes y el resto de Europa [20, 51, 53, 54, 80].

Al Kindi ^{apéndice-1}, filósofo, astrólogo, astrónomo, cosmólogo, químico, matemático, músico, médico, físico, psicólogo y meteorólogo árabe iraquí, nacido en Kufa (801) y muerto en Bagdad (873); autor sobre un tratado sobre espadas, habla del comercio de armas en el mundo musulmán ^[81], la diversidad de esos horizontes y el papel de encrucijada de los grandes centros de intercambio de Oriente. La clasificación que hace de los diferentes tipos de hierro y de espadas, según las características del metal y su procedencia o lugar de elaboración, es de orden a la vez técnico y comercial. Comienza con la distinción de las cualidades propias de los materiales empleados: al hierro “*que se encuentra en las minas*” (ma’dani), duro o dulce (*saburgan o narmahan*), se le pone el hierro “*que no se encuentra en las minas*”; con ellos se consigue el *acero purificado*, obteniéndose el wootz indio. Cuenta cuál es su procedencia, clasificándolas por esta característica en: *espadas antiguas* (Yemen, Qal’a y de India), *espadas modernas* y *espadas ni antiguas ni modernas*, donde se distinguen las *hojas del país* y las *hojas extranjeras*. Las hojas del país (Damasco) llevan el nombre del lugar donde han sido trabajadas (nombres emblemáticos): Hurasán Basra, *Isfahân*, etc.

Es evidente, según la literatura existente al respecto, que el acero de Damasco es un tipo de acero indisolublemente unido al devenir del mundo islámico y, su mejor lugar de fabricación, es Persia (Irán); donde destaca la ciudad de Isfahân. Pero no es el único lugar donde se forjaron estos aceros. Igualmente, se trabajaron en otros confines del mundo musulmán como Al Andalus, en el extremo occidente de este mundo islámico.

El apogeo en la fabricación de armas con este acero duró varios siglos, cuyo comienzo se puede hacer coincidir con el triunfo abasida sobre los omeyas de Damasco, y el traslado de la capitalidad del imperio islámico a Bagdad en Irak. La posterior utilización de armas de fuego, las fue relegando a un uso más simbólico y estético que guerrero, desapareciendo su fabricación en algún momento del último tercio del siglo XIX, como comentamos en otro epígrafe hablando de Alí Bey (Domingo Badía) ^[3].

Es importante, asimismo, saber que no todos los guerreros islámicos tenían armas fabricadas en acero de Damasco, y no en todas las regiones del mundo musulmán se forjaban o se importaban. En muchas de las regiones del mundo islámico, las espadas, cascos, etc., se fabricaban con aceros de baja o media calidad mecánica. Eso sí, la estética siempre se cuidó mucho, independientemente del tipo de acero utilizado. En las regiones de Turquía, Uzbekistán, Afganistán, Pakistán, India, el Archipiélago Malayo, Magreb, etc., aparecieron otros tipos de aceros con aspecto que quería semejarse al legítimo acero de Damasco. Esto es el acero de Damasco soldado, hecho por forja en caliente de láminas de acero superpuestas de aceros de diferentes contenidos en carbono. Ejemplares de este tipo se encuentran en Turquía, Cáucaso, India, ...

Las armas fabricadas en acero de Damasco tenían un precio muy elevado; sobre todo, aquellas que venían de Persia con la increíble belleza de sus bandas sinuosas de carburos de hierro, insuperables en toda la historia de este acero. Hay que pensar que, sólo personajes destacados llegaron a poseer estas armas, que eran consideradas talismanes por su estética y su filo cortante. En algunos casos, secciones especiales de las tropas podían poseer espadas, escudos, cascos, etc., en acero de Damasco, como ocurrió en algunos enfrentamientos bélicos en la Península Ibérica en la época del Califato de Córdoba.

I. 1.k.- El Acero de Damasco en Al Andalus.

En Al Andalus, como una región más del gran imperio islámico, también se forjaron armas y otros útiles en acero de Damasco o al-hind. Son pocos los estudios históricos que se han dedicado a estudiar las fuentes escritas en este periodo, tanto en el lado musulmán como en el cristiano, en época medieval en la Península Ibérica. A falta, hasta el momento, de objetos arqueológicos fabricados en la Península Ibérica, es necesario recurrir a las fuentes escritas (crónicas), tanto andalusíes como castellanas. Casi todas las referencias, a este acero, están adscritas a una zona geográfica muy concreta, como es: Persia, India, Irak y Siria. Los estudios relacionados con esta zona son muy exhaustivos, y cuentan, con una enorme cantidad de cronistas de gran prestigio que describen minuciosamente las calidades, técnicas de fabricación, procedencia, comercialización, etc., de estas armas y objetos fabricados con acero de Damasco (acero indio).

Era del todo una obligación, en esta investigación, hacer una inmersión en las crónicas árabes y cristianas medievales de la Península Ibérica, para rescatar esa presencia histórica del acero de Damasco en Al Andalus, en este extremo occidental del imperio islámico.

Hasta el presente, sólo dos autores han estudiado con detalle las crónicas medievales de la Península Ibérica, a la búsqueda de noticias sobre el acero de Damasco. El primero fue Bronson (1986) ^[82], en un trabajo sobre producción de acero al crisol en el Islam. Es muy superficial en lo que se refiere al caso de Al Andalus. En cambio, Karlsson ^[83], dirigido por el profesor Antonio J. Criado Portal (1996-2006) ^[18-20, 42, 53, 83-88], realizó un trabajo más exhaustivo y dedicado exclusivamente a las crónicas árabes andalusíes y castellanas de los siglos IX al XIV, referidas a Al Andalus, Castilla y León y las posesiones andalusíes en el norte de África: Ceuta, Tánger y Melilla. En esta investigación histórica, realizada para esta tesis, se ha continuado con la labor emprendida por Karlsson y Criado. Se ha tratado de concretar aquellos momentos históricos en que se hace una clara alusión al acero de Damasco (acero indio).

Es necesario volver sobre los términos empleados para referirse a este acero, tanto en las crónicas árabes andalusíes como cristianas castellanas. Ya hemos dicho que el nombre genérico árabe de las aleaciones hierro-carbono es *hadid*. Así, el botánico y farmacólogo andalusí, Ibn al-Baytar al Malawi (Málaga, 1180- Damasco, 1248) ^[89], clasifica las distintas calidades de los aceros árabes y habla del *hadid*, nombre genérico de las aleaciones hierro-carbono y del *fulladh*, con el que se refiere al acero indio. Este *fulladh*, es un término de cierto éxito en el mundo islámico y su procedencia es de Persia ^[90].

Por parte castellana, en el libro “*Lapidario y Libro de las Formas e Imágenes*” (1278) ^[91], de Alfonso X El Sabio (Toledo 1221-Sevilla 1284), rey de Castilla, llama al acero de los árabes como *alhinde* y *andanico*, ambos nombres derivan del nombre árabe al-hind o al-hindi (acero indio); mientras que, para su entorno cristiano, el hierro es *fierro* o *ferro* (del latín ferrum) y el acero es *azero*.

En otro libro de Alfonso X El Sabio, “*Libros del Saber de Astronomía*” (1277) ^[92], se describen diferentes instrumentos astronómicos, su fabricación y sus aplicaciones. A propósito de la fabricación de astrolabios, describe cómo el compás que

sirve para grabar en la placa circular (placa madre o mater), algo cóncava, de este instrumento, las circunferencias graduadas que la cruzan, debe ser de *açero* (acero) o de *alfinde* (al hindi, acero indio).

En la Granada nazarí del siglo XIV, *Ibn Hudhayl*, poeta, filósofo y excelente médico, muerto en 1352 (se desconoce el año de su nacimiento), describe en su libro “*Gala de Caballeros. Blasón de paladines*”, escrito en honor del rey nazarí Muhammad VII en su ascenso al trono en 1392 ^[93], las diferencias entre las *espadas francas* hechas con acero natural, denominado en el mundo árabe musulmán como *mudhkkar*, y que al-Kindi ^[81], denomina *shaburgan*, nombre de origen persa; frente a las musulmanas forjadas con *al-hindi* (acero indio). Es interesante leer la descripción detallada que hace Ibn Hudhayl de la fabricación de las espadas francas, por soldadura de láminas de acero y de hierro alternadas, que dan una excelente flexibilidad a estas armas. La descripción de Ibn Hudhayl se puede comparar con la descrita en la obra “Los libros del saber de Astronomía” de Alfonso X El Sabio ^[92], sobre las diferencias entre el acero indio (*alfinde*) de los andalusíes y el fierro calçado con *açero* (hierro calzado con acero), que no es otra cosa que acero franco, a base de mejorar el hierro con láminas de acero por forja.

Aún se puede ir más lejos. Hay testimonios, que se extraen de las crónicas de la época medieval, de los que se deriva no sólo la claridad y especificidad de los términos: *al-hindi*, *muhammad*, *hindiyya* o *hinduwani*, como un acero de gran calidad y referido al *acero indio* o *acero de Damasco*; sino que, además, sirve para asegurar que dicho acero se fabricó en el solar geográfico de Al Andalus ^[82, 94,95].

El prestigioso arabista H. Pères, asegura que el magnífico *acero indio* (acero de Damasco) se fabricó en época medieval en España ^[96]. Una llamativa y clara alusión al acero indio (acero de Damasco) en Al Andalus viene del poeta, escritor, historiador, filósofo, médico y político Lisan al-Din Ibn al-Khatib (Ibn al-Jatib), nacido en Loja en 1313 y asesinado en Fez en 1374. Algunos de sus poemas decoran algunas paredes de la Alhambra. Durante la mayor parte de su vida fue visir del rey de Granada Muhammad V. Al-Khatib, refiere, cómo en el ataque a Barcelona en 985, por parte de Almanzor (al-Mansur), visir del califa cordobés Hixam II, sus escuadrones más selectos, llevan *acero indio* (*qaramid al hind*) para protegerse de las espadas francas ^[97]. Este singular término de *qaramid* ^[98-99], se refiere a unas piezas de protección en sus escudos, armaduras y grebas en forma de placas, parecidas a tejas, forjadas en *acero indio* (acero de Damasco) para protegerse de los golpes y tajos de las espadas francas. No sólo atacan con armamento ofensivo de acero indio (acero de Damasco) sino que, además, se protegen de los tajos de las espadas francas con el mismo acero. El 6 de Julio del 985, tras 8 días de asedio feroz, donde se midieron los mejores armamentos cristianos y árabes, la ciudad de Barcelona fue saqueada e incendiada por las tropas del visir cordobés Almanzor. Se trata de un elevado número de armas y piezas forjadas en acero indio (*al-hindi*), para equipar a numerosos grupos de guerreros. Aunque no es de extrañar este hecho, ya que el Califato de Córdoba poseía una gran capacidad en la fabricación de armas, que sólo en los talleres de la ciudad califal de Medina Azahara, la producción se hacía a medias entre los herreros Abu al-Abbas “al Bagdadí” y Talha “al-Saqlabi” (el eslavo), suponía 13.000 escudos, 12.000 arcos árabes y turcos y 20.000 puntas de flecha anuales ^[97], según relata el referido, anteriormente, Ibn al-Khatib. Todas estas noticias reflejan la capacidad del Califato de Córdoba para fabricar armamento en cualquier tipo

de acero, incluido, en acero de Damasco (acero indio). Estas son sólo las noticias, de unos talleres, en una ciudad del Califato.

En la biografía de Yusuf ibn Tasufin (1062-1106), fundador del Imperio Almorávide y fundador de Marrakech, su capital, que dio nombre a Marruecos, basada en su mayor parte en las crónicas del emir de Baeza, Abd Allâh Abn Muhammad “al-Bayasi” (asesinado en Granada en 1255), se relatan unos hechos muy importantes relacionados con el acero de Damasco (al-hindi). Esta biografía de Yusuf ibn Tasufin fue escrita por el jurista, teólogo y gramático kurdo Abbas Ahmad ibn Muhammad ibn Khallikan (ibn Jallikan) (Arbil-Irak 1211- Damasco-Siria 1282), nombrado el más erudito y mejor historiador de su ciudad, incluida en su espléndida obra “Diccionario Biográfico”, y basada, como se ha dicho, en crónicas de al-Bayasi. En ella se relata cómo el rey poeta de la Taifa de Sevilla, Muhammad ibn Abbad “al-Mutamid” (Beja-Portugal 1040- Agmat-Marruecos 1095), pide ayuda a Yusuf ibn Tasufin para que frene el avance de las tropas castellanas, al frente de las cuales viene el rey de León y Castilla, Alfonso VI (León 1040- Toledo 1109). Alfonso VI había conquistado Toledo un año antes, el 25 de Mayo de 1085. Este fue el disparo de salida para la solicitud de ayuda a Yusuf ibn Tasufin por parte de al-Mutamid. Ibn Tasufin entra en la Península por Algeciras y se dirige con sus tropas hacia Toledo por la ruta menos peligrosa, la de Extremadura. Mientras avanza se le unen tropas del reino de Córdoba, Sevilla y Badajoz. El 23 de Octubre de 1086 en Sagradas (en árabe Zalaca o az-Zallaqah), en las proximidades de Badajoz, se produce el choque con el poderoso ejército cristiano de Alfonso VI El Bravo. El encuentro fue terrible y la derrota de Alfonso VI muy cruenta. Él mismo, herido en una pierna, tuvo que salir huyendo y refugiarse en Toledo. De esta batalla se acuñó el término “sarracina”. La principal causa de la derrota del rey Alfonso VI fue la aparición en combate de la guardia personal de Yusuf ibn Tasufin, cuando aún la batalla permanecía indecisa. Ésta consistía en una fuerza de elite de 4.000 fanáticos guerreros senegaleses y tuaregs de las tierras del Senegal y Mauritania en poder, entonces, del Imperio Almoravide. Todos ellos con el rostro pintado de negro, con harapos, asimismo, de colores oscuros, negros y azules, con espadas de acero indio (suyuf al-hindi) y jabalinas con puntas del mismo acero, gritando de forma ensordecedora y tocando tambores que, según las crónicas, hacían temblar el suelo y el cielo. El ejército castellano-leonés quedó paralizado; comenzando lo que sería la gran sarracina de Sagradas (Zalaca) ^[100]. Las espadas y el armamento en acero de Damasco (acero de la India) fue adquirido en las ciudades andalusíes del norte de África, fundamentalmente, en los talleres de Ceuta, que los venía fabricando desde hacía siglos. Este hecho está referido tanto en las crónicas de Alfonso X El Sabio ^[91,92], como entre autores árabes andalusíes. Así, Abu Bakú Ibn Isa al-Dani Ibn “al-Labana” (Benisa-Taifa de Denia 1050- Taifa de Mallorca 1113), célebre poeta que en uno de sus poemas, refiriéndose a la corte del rey al-Mutamid de Sevilla, habla de espadas de acero indio (sayf muhammad), forjadas en los talleres sevillanos ^[96]. Del mismo modo, el destacado poeta e historiador andalusí, al servicio de los almorávides, Abu Bakú al-Sayrafi (Orihuela 1074- Granda 1162), cuenta en sus libros de historia las cualidades de las espadas de acero indio (hindawani), que poseían los guerreros almorávides y su eficacia frente al armamento cristiano ^[96]. Sevilla fue uno de los centros de producción de armas con acero indio.

Otro autor que se refiere a Sevilla como centro productor de armas con acero indio, es el geógrafo granadino del siglo XIII, Muhammad ibn Abu Bakú “al-Zuhri”. Este al-Zuhri relata en su célebre libro sobre geografía universal “*Kibab al*

Jaghrafiyya”, de forma contundente la fabricación de armas en acero indio (al-hind), por parte de los herreros andalusíes en todo Al Andalus, haciendo hincapié en la ciudad de Sevilla ^[101].

Igualmente, el famoso agrónomo sevillano Abu Zakariya ibn al-Awwam “al Ishbili”(segunda mitad del siglo XII-mediados del siglo XIII), en su libro sobre agricultura “*Kibab al Jilafa*”, describe remedios para curar a los animales y el riego por goteo antes que los agricultores del siglo XX. Ibn al-Awwam enumera varios instrumentos quirúrgicos de gran precisión fabricados en Sevilla en acero indio (hadid al-hindi). Hay una referencia muy interesante en la intervención quirúrgica de los ojos de los animales con estos instrumentos de precisión ^[102].

No sólo se fabricaron armas e instrumentos quirúrgicos de precisión con acero indio, sino también espejos. Así, el poeta granadino al-Khatib, citado anteriormente ^[97], refiere el uso de espejos en acero de Damasco (acero indio), que recién pulidos devuelven una imagen muy bella y amplia de todo lo que se refleja en ellos, exactamente igual que las espadas de doble filo en acero indio recién pulidas. La palabra árabe que define a estos espejos es “*mirat hindiyya*”. Hay numerosos relatos de autores andalusíes que cuentan cómo se pulían las superficies de los espejos de acero de Damasco (acero indio). Asimismo, describe los espejos, en acero indio, el geógrafo, viajero y poeta andalusí, *Abu Husayn Muhammad “ibn Jubair”* (Valencia 1145- Egipto 1217). Cuenta y describe que se reflejan las imágenes con gran belleza en estos espejos fabricados en acero indio ^[103].

Estos espejos en acero indio, no sólo se fabrican en Al Andalus, sino en otros confines del Mundo Islámico. Así, el mercader y explorador veneciano Marco Polo (Venecia 1254- 1324) cuenta en las crónicas de sus viajes a Oriente cómo, al pasar por la ciudad de Kuh-Banan en la región de Kerman (Persia), pudo observar que había mucho hierro, acero y ondanique (acero indio), y se fabricaban grandes espejos con este acero, con formas muy bellas ^[94]. Del mismo modo, describe algunos productos exóticos que se producían y comercializaban en esa región de Persia.

Todo lo expuesto anteriormente viene a remarcar la existencia de talleres en Al Andalus, donde se fabricaban armas y otros objetos, como útiles quirúrgicos y espejos, con acero indio (acero de Damasco), como ocurría en otros lugares del mundo islámico: Persia, Siria, Irak, etc.

Una cita más que redundante en la existencia de estos talleres en Al Andalus se extrae del libro “*La vida de Santo Domingo de Silos*”, compilado por el padre Sebastián de Vergara en el siglo XVIII. En este texto escrito por Pero Marín (fallecido en 1291), en el siglo XIII, debe tratarse con cuidado un relato. Una parte de este texto trata de la mala suerte de un tal Domingo Bono durante el año 1285. Este cristiano fue capturado por una banda de traficantes de esclavos y vendido por dos veces; terminando, finalmente, en Ceuta (Marruecos), andalusí en época medieval y, ahora, perteneciente a España. Vendido como esclavo para trabajar con un artesano musulmán, el pasaje es claro y conciso, aportando detalles como fechas exactas y lugares concretos e, incluso, a los precios a que fue vendido este hombre. La meticulosidad de la información valora muy positivamente este pasaje. Hace referencia a la ubicación de la industria del acero en la ciudad de Ceuta y es muy significativa la referencia al acero indio (al-hind). Dicha referencia es la siguiente ^[104]:

“...Fue puesto a trabajar, por los moros, de día fabricando alhinde, que es muy importante para la guerra, al ser un acero muy fuerte para fabricar espadas y azagayas (venablo, dardo pequeño arrojadizo)y, por las noches, le mantenían en habitaciones bajo tierra.”

Ceuta fue una ciudad andalusí desde su conquista por el califa cordobés Abd al-Rahman al Nasir en 931. Se convirtió en una ciudad más del mundo andalusí y en una fortaleza contra el avance del poder del califato fatimí en el norte de África.

Por otra parte, parece que Domingo Bono pudo estar involucrado sólo en la fabricación del acero y no en la forja de éste. Esto implica que el trabajo de los esclavos fue utilizado, al menos por los musulmanes de Al Andalus, en el trabajo más pesado y penoso de la obtención del acero, quedando la forja de armas y herramientas para especialistas que tenían una mayor experiencia.

El andalusí, Alí ibn Musa “ibn Said” al Magribi (Alcalá la Real 1213- Túnez o Alepo 1286), historiador, geógrafo y compilador de poemas, publicó en 1250 su “Kitab al-Jugrafiya” (Tratado de Geografía) y, en él, describe la industria de la fabricación de acero en Sevilla durante la primera mitad del siglo XIII; indicando que la calidad del acero indio (fulladh) fabricado era excelente^[105,106]. Al describir otros centros menores de producción de acero, cita a Almería y Murcia. De la lectura de sus palabras, se deduce, que el acero indio fabricado en Sevilla era superior. Esto entra dentro de la lógica, ya que fue el centro principal para la fabricación de acero indio durante el periodo almohade, en que esta ciudad fue capital de Al Andalus.

Ya antes, a finales del siglo XII, como ya hemos comentado anteriormente en este estudio, al-Zuhri^[101], habla en su tratado “Kitab al-Jugrafiya” (Tratado de Geografía) del acero indio con el término *al-hindi*. Todo esto, tanto de al-Zuhri, primero como con ibn Said, después, viene a corroborar que el acero indio se siguió fabricando en Sevilla tras la conquista cristiana por parte del rey de Castilla, Fernando III El Santo (Bolaños de Calatrava 1199- Sevilla 1252), en 1248. Este suceso marcó el momento de mayor expansión del reino de castilla. En la actualidad, no podemos estar seguros de si la fabricación de acero indio continuó después de la conquista castellana; ya que el rey Fernando expulsó de Sevilla a la mayoría de sus habitantes. Tal vez, todo quedó en la expulsión de los musulmanes más recalcitrantes, ya que es muy revelador que el rey Pedro I El Justiciero (Burgos 1334- Montiel 1369), que fijó la capital de Castilla en Sevilla, ciudad en la que vivió hasta su muerte, legó en su testamento a favor de su hijo Alfonso X El Sabio (Toledo 1221- Sevilla 1284) una espada árabe fabricada exprofeso para él, unos años antes de su muerte en 1362, en un taller sevillano, por parte de un herrero musulmán o converso al cristianismo. Lo que nos puede hacer pensar que se siguió fabricando acero al crisol en Sevilla, al menos, hasta la segunda mitad del siglo XIV.

Es posible que algunos mudéjares continuarán con esta tradición del acero indio; sin embargo, no hemos encontrado, hasta ahora, crónicas que nos revelen ese hecho. Es muy posible que los maestros herreros se fueran reconvirtiendo a otros tipos de aceros más europeos llegándose, finalmente, al acero español o de Toledo. Las calidades variaron mucho, existiendo a partir de esos siglos XIII y XIV, una gran diversidad de aceros, unos de gran calidad como los del tipo toledano y otros de calidades intermedias

y muy bajas. Así, a algunos aceros de cuchillería, navajas, puñales y espadas, procedentes de los más célebres lugares de España, apenas si se les puede tildar de aceros ya que son meros hierros. Por lo tanto, a partir de esos siglos, el considerado verdadero rey del acero en Europa es el acero español, también denominado, acero de Toledo.

Así parece que el acero de Damasco, el acero indio (al-hind), se esfumara de la Península Ibérica con la desaparición de Al Andalus. Los árabes trajeron el arte de la fabricación y forja del acero de Damasco y, al irse, se lo llevaron con ellos. Queda la asignatura pendiente de comprobar si las formidables espadas jinetas nazaríes de Granada, de los siglos XIV y XV, están forjadas con acero indio. Entra dentro de lo probable que así lo sea.

El último cronista andalusí que se refiere al acero al-hindi, en la Península Ibérica, es Abd al-Munim “al Himyari”, que editó en el siglo XV (1461) un libro de geografía que se convirtió en fundamental para todos los europeos durante siglos. E. Levi Provençal, da cuenta de él en una traducción al francés: *La Peninsula Iberique au Moyen Age d'après le “Kitab al-Rawd al-Mitar”* (el libro del jardín fragante) de Ibn Abd al-Munim “al-Himyari”, publicado en Leiden por E.J.Brill, en 1938. Al Himyari hace referencia al acero indio (al hindi) en Al Andalus, pero basándose en las crónicas de autores anteriores que ya hemos referido.

Para terminar es necesario traer a colación, que las armas fabricadas en el territorio de Al Andalus, con acero indio o acero de Damasco, no presentaban las vetas sinuosas que tanto admiramos en estos aceros. Y es que la calidad no está reñida con la existencia o no de esas vetas, ya que se puede asegurar que los aceros de Damasco que no las presentan poseen mejores características mecánicas. Y, no es menos cierto que, si se templean, es imposible hacer resaltar esas vetas aunque existan ^[8-18, 20]; ya que los ataques químicos necesarios para revelarlas las ennegrecen debido a la presencia de martensita. Sólo se resaltan los carburos de hierro primarios de las bandas si la matriz es ferrítica. En este caso, la sustancia oxidante seleccionada para resaltarlas disuelve la ferrita y deja intacta la cementita, produciéndose un efecto luminoso de relieve que permite visualizar las bandas de cementita en claro, por la reflexión de la luz y, en oscuro, a la ferrita por su profundidad frente a la cementita después del ataque.

Recordemos lo mencionado con anterioridad sobre la fabricación de espejos y otros instrumentos con acero de Damasco; se pulían cuidadosamente para poder reflejarse en ellos, como cuentan en sus crónicas los ya citados anteriormente: al-Kathib ^[97], ibn Jubair ^[103] y, el mismo Marco Polo ^[94]. No sólo nos hablan de las bellas imágenes que se reflejan en un espejo de acero indio recién pulido sino, también, el magnífico brillo de las espadas de doble filo recién pulidas. No es de extrañar que, el alto contenido en carbono de estos aceros, les hacen presentar un aspecto metálico muy blanco y refulgente.

Es curioso que ninguno de los cronistas musulmanes reseñados se refiera a ese detalle de las vetas sinuosas de su superficie que, siendo tan bellas y atractivas, no hubieran dejado pasar por alto. En esto coinciden los cronistas musulmanes orientales, lo que viene a significar que en los primeros siglos del imperio musulmán, los herreros, no perseguían las vetas sinuosas sino, exclusivamente, la calidad de estas armas de filo muy cortante y gran resistencia mecánica.

Se puede pensar que la forja de armas con acero de Damasco comienza a dar importancia a la estética, proporcionada por la presencia de estas vetas sinuosas, en los legendarios talleres de Persia a partir del siglo XIV. De esta manera, las piezas conservadas que presentan estas vetas son posteriores a esa fecha. Así, el gran maestro herrero Assad Allâh al-Isfahânî pudo ser uno de los creadores de esta escuela, convirtiéndose, además, en el más prestigioso de todos ellos.

Para terminar, hay que dejar claro que todo el acero de Damasco (acero indio) que se utilizó, para fabricar armas blancas y otros objetos, no procedió de India. Incluso una gran parte del acero indio manufacturado en India era adquirido, previo a su transformación en al-hindi, en la costa oriental de África, China y otros lugares fuera de India. El nombre de acero indio, al hindi, viene impuesto en el mundo islámico por la fuerte exportación hacia lugares como Persia, Mesopotamia, Pakistán,... y, seguramente, a haber sido sus descubridores en los primeros siglos. En otros muchos lugares como Al Andalus, por ejemplo, en el extremo occidental del mundo musulmán, en el lugar más alejado de India, no es probable que importaran el acero indio; ya que sería un producto muy encarecido por los largos trayectos necesarios para su adquisición. Al Andalus, África del Norte, etc., tenían excelentes explotaciones de hierro, con lo que no necesitaron de esas importaciones.

Piénsese, además, sobre las noticias y crónicas relatadas con anterioridad, donde se describe fielmente la obtención, primero del acero indio en esos lugares de Al Andalus y, después, su forja para obtener espadas, puntas de lanzas y flechas, azagayas, protecciones, espejos, instrumentos quirúrgicos, compases, etc. Por tanto, a muchos lugares del mundo islámico llegaron los conocimientos y el arte de la fabricación del acero indio y su forja, pero no los lingotes de al-hindi. El nombre, la fama y prestigio, unidos a sus procesos metalúrgicos de beneficio, recorrieron el mundo islámico; los lingotes de acero indio (wootz), tuvieron un gran alcance, pero limitado a su zona de influencia. Fue como una marca impuesta a un producto como: Casera por gaseosa, Danone por yogurt, Bimbo por pan de molde, etc. Se impuso el nombre de acero indio al estilo particular de fabricar estos aceros; pero algunas crónicas, ya citadas, cuentan cómo se fabrica el acero indio y cómo se forja en lugares muy precisos: Sevilla, Ceuta o la misma Persia, en Isfahân, etc.

I. 2.- Antecedentes de Estudios Científicos: Crónicas Medievales y Noticias del Siglo XIX

Ya son numerosos los científicos que han dedicado parte de su tiempo a desvelar los misterios del acero de Damasco ^[23-50]. Científicos e ingeniero como Wadsworth, Sherby, Verhoeven, Pendray, Criado, Calabrés, Piaskowski,..., han tratado de estudiar y explicar los numerosos secretos que envuelven a la forja de los aceros de Damasco. En la actualidad, todos están de acuerdo en la temperatura de forja: (650-750)°C; pero no en otras cuestiones importantes como:

- tratamientos térmicos del lingote previos a la forja,
- inicio de la forja,
- requisitos para la aparición de las características vetas sinuosas,
- etc.

Si bien es cierto que todos ellos han conseguido forjar el acero de Damasco, sólo en nuestro caso, hemos reproducido los dibujos con las vetas de carburo de hierro, llegando a obtener un puñal con uno de los dibujos más enigmáticos que se han podido reproducir en la forja de estos aceros. Se tratan de polígonos pentagonales y hexagonales, en forma de red blanca, sobre el gris oscuro de la matriz de ferrita, que coincide con el tipo d, de la clasificación de Anossov ^[20] (Introducción, pág.38). Igualmente, se han obtenido cuchillos con marcas superficiales muy finas, y otros sin esas marcas superficiales, que coinciden con los Damascos más antiguos, en los que la estética superficial en forma de bandas sinuosas fue reemplazada por un brillo de espejo, como ya se ha discutido anteriormente.

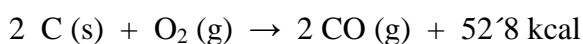
En el caso de científicos mencionados como Wadsworth, Sherby, Verhoeven,..., reconocen haber forjado estos aceros, aunque el resultado final no presenta el aspecto de los damascos históricos.

Nuestro éxito se ha basado, en gran parte, en el estudio detallado de las crónicas árabes medievales y de las de aquellos viajeros con un fuerte carácter científico, de origen británico y ruso, que se movieron durante el siglo XIX por tierras de India, Irán, Irak, Pakistán,...; países míticos en esto del acero de Damasco.

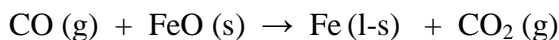
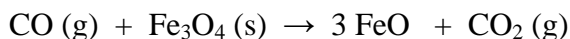
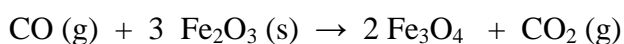
Pues bien, basándonos en los detallados escritos de los cronistas árabes medievales, ya citados en el texto, como: al Idrisi ^[72], al Kindi ^[81], ibn al Baytar ^[89], al Hudhail ^[93], ibn al Khatib ^[97],..., y del célebre historiador, astrónomo, astrólogo, matemático y farmacólogo persa Muhammad ibn Ahmad “al Biruni”^{apendice2} (Kath-Uzkkistán 973-Gazni-Afganistán 1048) ^[102] sobre el acero indio (al hindi), hemos podido reunir detalles coincidentes de todos ellos y otros datos complementarios, muy precisos, de al Biruni y al Kindi. Con las descripciones de todos ellos se puede tener una idea clara de la fabricación de armas blancas y otros objetos, con el acero indio (al-hindi).

Resumiendo el procedimiento que se deriva de la lectura e interpretación de las crónicas de los autores antes citados, se puede llegar a ver un proceso detallado minuciosamente. Así, para obtener los lingotes de acero indio (wootz) se utilizaban dos etapas. La primera no difiere en nada con los procesos de reducción del mineral de hierro

que se realizaban en todas las localizaciones geográficas más diversas de África, India, Persia, Mesopotamia, Al Andalus o Europa. Esta primera etapa es de obtención del hierro en un horno de mampostería o ladrillos refractarios, enlucidas las paredes con arcilla refractaria. La altura del horno oscilaba de un lugar a otro, aunque en todos los casos, no superaba el metro o metro y medio, siendo, en muchas situaciones, más pequeños. Se apilaba el mineral y el carbón vegetal en capas alternadas de abajo arriba. Tenían siempre en cuenta el tamaño de los trozos de mineral y de carbón para que circulara el aire y no se ahogara el horno. Encendido éste, a través de uno de los orificios de las toberas de soplado de los fuelles, se insuflaba aire, constantemente, con la máxima precaución y economía para el comburente, para que éste fuera suficiente para mantener encendido el horno, pero que su cantidad se ajustara a una combustión algo pobre, para así conseguir un equilibrio entre el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂), lo más desplazado posible hacia el gas CO de gran poder reductor. Las reacciones que se producían en estos hornos, sabemos en la actualidad, son las siguientes:



Al contacto a alta temperatura, conseguida por la reacción de combustión incompleta del carbón vegetal, con mineral de hierro, se produce la reducción de éste, de forma gradual, hasta llegar al hierro, según las reacciones siguientes:



En los casos en los que el mineral de partida no sea la hematita (Fe₂O₃), muy abundante, y se trate de magnetita, hecho corriente en India, la primera reacción de reducción no sucedería. Las temperaturas más elevadas se encuentran siempre en la zona de soplado de las toberas de los fuelles. Al no llegar a la temperatura de fusión del hierro, el producto obtenido es una pella, lupia o zamarra de hierro, formada por hierro, carbón vegetal sin quemar, escorias, etc.

Seguimos de nuevo los relatos de nuestros cronistas árabes medievales que describen, cómo de esta manera, se llegaba a obtener una masa pastosa de hierro maleable con escorias, que era afinada por calentamientos y martilleos sucesivamente; obteniéndose un lingote (pletina) bastante purificado (hierro pudelado).

Después de cortar en pequeños trozos el lingote purificado por golpeo (forja) en caliente, eran introducidos en crisoles de arcilla con trozos secos de madera, todo recubierto de hojarasca verde y, finalmente, se sellaba con arcilla refractaria. A veces, hasta dos docenas de estos crisoles eran apilados en un horno de carbón de leña, sometidos a una fuerte ventilación durante horas. Una vez enfriados y rotos, se extraían los lingotes de acero del crisol. Al-Biruni y al-Kindi describen que este proceso duraba hasta que al mover con las tenazas los pequeños crisoles, se notara un chapoteo del líquido. En ese momento, la operación había terminado.

Se ve claramente a la luz de nuestros conocimientos actuales que, el proceso de cementación del lingote había alcanzado el campo bifásico de austerita más líquido, del eutéctico hierro-carbono. Para ello, la temperatura necesaria debía superar los 1300°C. Hecho éste que se constata en las crónicas de los autores antes citados, que anotan con precisión, que las temperaturas alcanzadas, en estos hornos, eran muy elevadas.

La velocidad de enfriamiento desde este campo bifásico (austenita más líquido) es clave para la obtención o no de las vetas sinuosas de cementita proeutectoide. Si el enfriamiento se hace muy lento, toda la estructura del acero, al atravesar el extenso campo austenítico se transformará finalmente, por difusión, en austenita de grandes granos. Al entrar en el campo bifásico austenita-cementita proeutectoide, esta cementita precipitará en los límites de grano austeníticos. A temperatura ambiente, se observarán grandes granos de perlita con la cementita proeutectoide en sus límites de grano. Hay versiones para todos los gustos según las teorías de los investigadores que han estudiado sobre el acero de Damasco. Unos opinan que el enfriamiento se hacía muy lento, como se ha descrito ^[60, 107-110] y otros, por el contrario, cuentan que este debía ser lento. Los cronistas medievales no dejan claro cuál debía de ser el tipo de enfriamiento para el acero al crisol; sin embargo, en este caso, la arqueología viene en nuestra ayuda. Y ésta es clara. Todos los lingotes (wootz) recuperados, hasta el presente, en India, Irán, etc., presentan una estructura dendrítica; incluso el que se describe en la Royal School of Mines de Londres, que posee un contenido en carbono relativamente bajo, del 1'34% en masa (Figura.42).

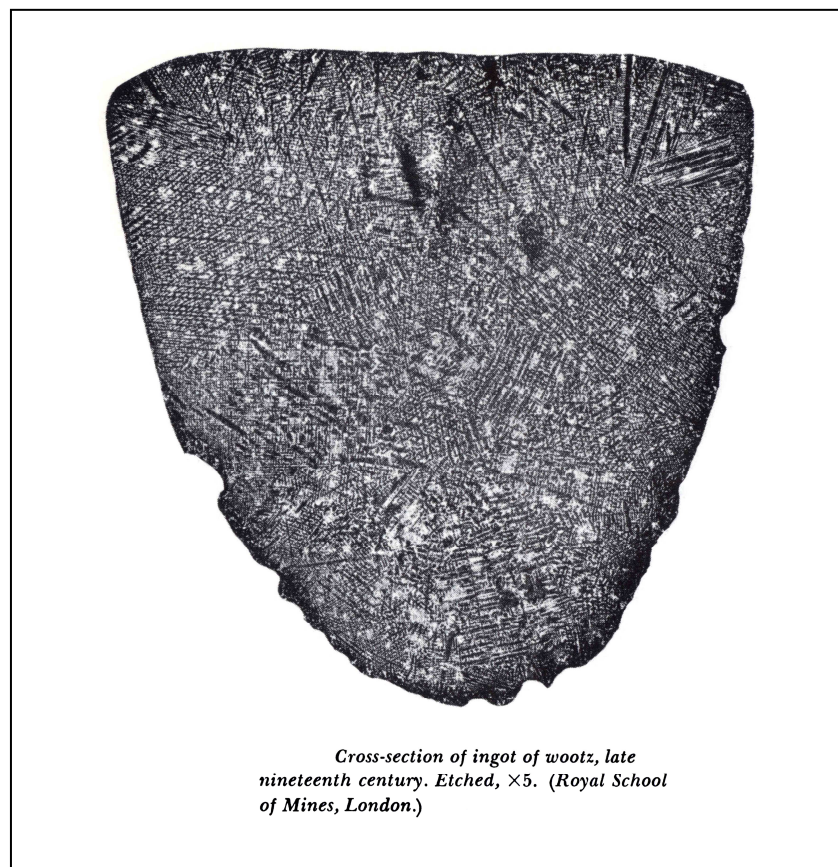


Figura.42: Sección transversal de un lingote de acero indio (wootz)

Este hecho, revelado por las piezas arqueológicas conservadas, viene a certificar que el enfriamiento se hacía relativamente rápido, muy posiblemente, fuera del horno. Este enfriamiento rápido permite conservar la estructura de acero ledeburítico conseguida durante la cementación a altas temperaturas. Ese chapoteo del líquido, que era señal del fin de la cementación, indicaba que estábamos en un campo bifásico sólido más líquido. El líquido, al enfriar, llega a la composición de la ledeburita y aparece ésta, aunque algo diferente de la de una fundición blanca. Este líquido interdendrítico, retiene casi todo el carbono del acero, empobreciendo a la austenita de forma notable. Si el enfriamiento es rápido, también durante el enfriamiento del sólido, se impide la difusión y se obtiene una estructura ledeburítica con carburos de hierro ledeburíticos de gran tamaño y, una estructura perlítica, más pobre en carbono del 0'8% en masa del equilibrio ^[111]. Todo esto, es favorable para la obtención por forja de grandes carburos esferoidizados, alineados en bandas, que se harán muy visibles por su gran tamaño. Es algo que ocurre hoy día con los aceros de herramientas hipercarburados ^[112].

Continuando con los cronistas medievales, la ausencia, más o menos clara, de la velocidad de enfriamiento se debió, seguramente, a que el enfriamiento no les llamó la atención, ya que era el convencional en la metalurgia del hierro. Estos cronistas medievales, al igual que otros del siglo XIX ^[60, 107-110], sí se muestran de acuerdo en que los lingotes, en general, se obtenían en tamaño acorde al objeto que se iba a forjar, esto es: espadas, puntas de flechas, compases, protecciones, espejos,..., para así aprovechar la estructura del lingote, con sus orientaciones dendríticas más o menos radiales, que influyen notablemente en la aparición de las bandas sinuosas de carburos durante la forja en caliente.

Asimismo, hemos podido comprobar que, tanto en las crónicas medievales como modernas, se habla de endulzar el acero del lingote antes de comenzar su forja. Esta operación se llevaba a cabo calentando a temperaturas de rojo sangre, próximas al eutectoide, en periodos alternados de varias horas. Según el prestigioso científico inglés, John Grant Malcomson (Forres-Escocia 1803- India 1844), colega y amigo del naturalista inglés Charles Robert Darwin (Sherewsbury 1809- Londres 1882), las tortas o lingotes (wootz) se recubrían de arcilla y se calentaban en el horno de 12 a 16 horas. Después de este calentamiento, se retiraba del horno, procediéndose a repetir la operación de 3 a 4 veces; hasta que el acero se hacía suficientemente blando para poder ser trabajado plásticamente. Es muy evidente que este tratamiento térmico, con pequeñas diferencias, es el que se aplica a los aceros aleados de herramientas hipercarburados. Se trata de esferoidizar los carburos de hierro en los Damascos y, los carburos de cromo y otros complejos, en los aceros de herramientas ledeburíticos. El recubrimiento con arcilla limitaba de forma contundente la decarburación del acero durante el proceso de esferoidización. Preparado el lingote para la forja, se efectuaba ésta, siempre a una temperatura en el rojo sangre, cercana a 750°C; pero, en ningún caso, podía sobrepasarse ya que supondría la ruina de la pieza ^[20, 103,105]. Estos datos se ajustan a lo aportado por los cronistas árabes medievales y por aquellos científicos exploradores del siglo XIX que visitaron India, Persia, etc., en la primera mitad del siglo XIX, cuando aún se fabricaban estas armas con el acero indio.

Un detalle muy especial que aparece en las mejores espadas de acero de Damasco, exhibidas en los museos, es la llamada escalera de Mahoma. Se trata de unas bandas

transversales a la longitud de la espada, a intervalos regulares, que simulan escalones en las arremolinadas bandas de cementita proeutectoide y que, desde un primer momento, se las denominó escalera de Mahoma (Figuras 28 a 38).

Según el científico suizo B. Zschokke, en una publicación de 1924 ^[80], propone la idea para explicar la escalera de Mahoma, que consiste en agujerear los lingotes de acero indio (wootz) en el centro; a continuación, debían de ser deformados plásticamente por forja radial y estirados posteriormente. Los dibujos radiales, visibles en la superficie del lingote, y ramificados transversalmente, se encuentran en la hoja de acero acabada, siempre que las condiciones de forja y temperatura fueran respetadas.

Sin embargo, C.S. Smith en su libro “A History of Metallography” ^[1], niega este hecho y asegura, basándose en Massalski ^[113] y De Luines ^[114], que estos escalones se producen por corte en caliente con una terraja, forjándose de nuevo, a continuación de esta operación. C. Pansieri ^[115], opina que este efecto se consigue, incluso, provocando la hendidura por forja con la terraja, pero sin corte. Según su criterio, las ranuras forjadas es un patrón más próximo a los Damascos históricos que las obtenidas por corte. L.S. Figiel ^[2] opina igual que C. Pansieri y presenta unas excelentes fotografías de espadas de Damasco con esta escalera de Mahoma (Figuras 28 a 38).

P. Anossoff, ingeniero de minas y Mayor General del ejército ruso, en 1841 ^[19,20] y, N.T. Belaiew, capitán de artillería de la Guardia Rusa, en 1918 ^[116-118], publican sus investigaciones sobre el acero de Damasco, llegando a las mismas conclusiones que los cronistas y científicos ya citados con anterioridad, en cuanto a temperaturas de forja y otras manipulaciones previas y siguientes a esta forja.

Finalmente, tras la forja, se procedía o no a su temple y posterior acicalamiento. En los casos, muy numerosos, en que la pieza forjada se destinara a aprovechar su excelente lustre, no se templaba. Éste era el caso de todos aquellos aceros que no presentasen las bellas bandas de carburos de hierro, tanto en armas y protecciones como en espejos, compases, etc. En estos casos, sólo quedaba el acicalamiento final, esto es, el pulido especular. Para las armas: espadas, shamshires, alfanjes,..., que presentaban las famosas bandas de carburos de hierro podía haber temple o no. El temple afea el aspecto de las bandas típicas de los Damascos; ya que, el ataque final, engrisa mucho la martensita de la matriz, lo que redundaba negativamente en el aspecto final. Sin templar, en los casos en que el acero presentara bandas de carburos, el aspecto, tras el ataque químico, se hace espectacular con sus bandas serpenteantes de cementita proeutectoide. De esta guisa se presentan los mejores ejemplares de shamshires persas de los talleres medievales de Isfahân; por ejemplo, los de Assad Allâh.

En el caso de conseguir una estructura de mayores prestaciones mecánicas, se producía la operación de temple. Pues bien, para esta última etapa contamos con un relato, único y preciso, de un observador que pudo contemplar esta etapa en directo. Se trata del relato de M. Baker, Cónsul General Británico en Alepo (Siria), que en 1818, publicó su experiencia con todo detalle en The Annual Register ^[116]. Todo surgió con el motivo de restaurar dos sables de acero de Damasco deteriorados por parte de un maestro armero experto que le permitió conocer su secreto. El relato, muy minucioso, sin ningún tipo de matización por nuestra parte, da una idea de la complejidad del proceso de temple y acabado de la hoja de acero de Damasco. Así, Baker, describe las operaciones observadas de la siguiente manera:

“...En primer lugar, al armero rellena una pila de madera de la longitud de las hojas aceradas (140 cm) y de una adecuada profundidad con un líquido compuesto de aceite de sésamo, sebo de carnero, cera virgen y nafta o, también, poso de betún (aceite mineral), ya que la nafta pura es muy cara. Posteriormente, enciende un fuego (hogar) con carbón de leña convenientemente apilado y, cuando ha ardido completamente, lo apaga extendiendo las cenizas según el tamaño y geometría de las hojas de acero a tratar; poniendo piedras alrededor del horno. Luego, sopla sobre el carbón encendido, con un abanico de plumas; hasta que queda nuevamente al rojo inicial. La operación debe hacerse de noche, para poder observar correctamente los colores.

Cuando la hoja de acero tiene el grado de color suficiente, se debe sumergir en el líquido antes descrito, dentro de la pila. De esta condición depende el éxito de la operación ya que, si la hoja de acero permanece demasiado tiempo en el fuego, el sable no está preparado y, si no está suficientemente caliente, no es homogéneo su calentamiento. Posteriormente, cuando la hoja está al rojo cereza, se retira del carbón encendido, introduciéndola en la pila con el líquido de temple.

La inmersión de la hoja de acero en el líquido, se hace súbitamente en toda su longitud y de perfil (de arriba abajo) para mejorar su filo. Esta segunda condición es esencial e indispensable. La hoja de acero debe permanecer en la pila hasta su enfriamiento, que tiene lugar en unos segundos. Retirándola de la pila, es puesta de nuevo sobre los carbones para desprender la herrumbre, todavía adherida. Cuando ya no humea, se deja enfriar y, después, se quitan con un cuchillo las cenizas que se han adherido. El mejor carbón para esta operación es el obtenido a partir de pino, pero debe ser pino nuevo y, el carbón ya usado, no vale para otra operación.

La solución, en la que se templan las hojas de acero para revelar las aguas, puede servir una cantidad de veces y, es mejor, cuanto más usada sea; sólo hay que tener la precaución de añadir, de vez en cuando, un poco de solución renovada para mantenerla siempre al mismo nivel.

Durante el calentamiento, la hoja de acero se puede curvar. En este caso, el maestro espadero, la endereza pasándola ligeramente sobre la muela (piedra de agua); después la pule, frotándola con un trozo de madera impregnado en aceite y polvo de esmeril y, la bruñe, con hematita. Posteriormente, frota la hoja de acero con polvo de cal, para absorber el aceite que haya quedado; teniendo gran precaución de no tocarla con las manos, ya que la limpieza de la hoja de acero es necesaria para que aparezcan las aguas. Para acabar de limpiarla, el maestro armero, la frota con ceniza de tabaco diluida en agua.

Terminado este trabajo con toda minuciosidad, se llena una gran pila de agua y se disuelve el mineral llamado zagh en un vaso de plomo. El zagh, es una sal que se obtiene en las montañas de los drusos o cerca de Ghazir (Beirut, (Líbano)). No se puede utilizar un vaso de otro metal que no sea plomo; aunque sí se puede usar una taza de porcelana o de cristal.

El armero, reparte con los dedos mojados la disolución zagh por la hoja acerada, con gran rapidez de un extremo al otro. Cada tres minutos, sumerge la hoja de acero en el líquido del gran barreño y la remoja con zagh, repitiendo la operación de ocho a diez veces, hasta que se aprecia que las aguas se han extendido perfectamente por toda la superficie. Entonces, frota nuevamente la hoja acerada y, cuando está seca, le unta aceite por encima. Cuando esta operación se hace en tiempo frío, como es el invierno, se debe tener la disolución de zagh a una temperatura aproximada de 24°C.”

El relato es espléndido y detallado, y no necesita de aclaraciones. Es minucioso y acertado y, demuestra que, el cónsul M. Baker estuvo presente en estas operaciones y tomó buena nota de todas ellas.

Sólo nos queda aclarar qué es el zagh, ese líquido que, el maestro armero, utiliza para grabar las bellísimas aguas de los aceros de Damasco por ataque químico superficial de las hojas de acero. Pues bien, en auxilio de este interrogante acude otro estudioso de este tema, el profesor B. Zschocke, que en 1924, en su revista “Revue Metallurgie”, publica sus análisis químicos realizados al zagh. Su composición porcentual, en masa, resultó ser ^[80]:

<i>Compuesto</i>	<i>% en masa</i>
Ganga	14´80
Alúmina	0´18
Sulfato de hierro (III)	17´67
Óxido de hierro (III)	1´79
Sulfato ferroso (II)	52´32
Sulfato de calcio	6´45
Magnesia	2´03
Agua	3´43
Álcalis (por diferencia)	1´42

Según B. Zchocke, es un mineral cuyos componentes mayoritarios son los sulfatos de hierro y, resulta de la descomposición natural de una roca inicialmente pirítica, en la que la pirita, se ha ido oxidando con el tiempo, pasando al estado de sulfato férrico, soluble en agua. Dado el carácter ácido del sulfato férrico, los herreros antiguos usaron soluciones acuosas obtenidas por lixiviación, de este mineral, para realizar el ataque de las hojas de acero de Damasco.

I. 3.- Antecedentes Científicos y Tecnológicos en el Siglo XX

Aunque son numerosos los científicos que han tocado el tema de la fabricación del acero de Damasco, en la segunda mitad del siglo XX, son pocos los que han dedicado el tiempo necesario para conocer sus secretos. Los equipos de investigación dirigidos por J. D. Verhoeven, O. Sherby y A. J. Criado, de las universidades de Stanford e Iowa de Estados Unidos y Complutense de Madrid en España, respectivamente, mantienen líneas de investigación encaminadas a desvelar los misterios de estos aceros ^[26-50].

En el caso de J. D. Verhoeven y O. Sherby ^[23-46], sus estudios teórico-prácticos tratan de relacionar los tamaños y disposiciones, de la cementita proeutectoide, con la obtención de estructuras similares a las espadas de acero de Damasco, que presentan las bandas de carburos visibles; empleando tecnologías de fabricación convencionales para aceros aleados.

Para Verhoeven y sus colaboradores, el secreto radica en las impurezas de aleantes que acompañan a los aceros de Damasco y que influyen, de manera notable, en el tamaño y morfología de los cristales de cementita, causantes de la estructura de aguas características de las hojas de acero de Damasco. Afirman que, el alto contenido en fósforo, podría controlar el mecanismo de formación de la cementita. De esta manera, la microestructura de los lingotes wootz, vendría producida por la microsegregación de fósforo ^[29] que influye, de forma muy activa, en la obtención de estructuras dendríticas.

Si nos basamos en los análisis químicos realizados por Zschocke ^[80] en 1924, a espadas de acero de Damasco de la colección de 2000 piezas de Henri Moser (Museo Histórico de Berna, Suiza), observamos que los contenidos en fósforo oscilan alrededor del 0'2% en masa. Asimismo, el contenido en fósforo del shamshir de Mehemet Alí (museo del Ejército, Toledo), es de un 0'2% ^[2]. Estos contenidos en fósforo, son habituales y se reducen, notablemente, con la aparición frecuente en la metalurgia del hierro y el acero, desde la antigüedad hasta el siglo XIX, con la aparición de convertidores Bessemer y Siemens-Martín ^[120]. Es una contaminación natural del carbón vegetal e, incluso, del mineral. A.J. Criado ha analizado numerosas muestras de objetos de acero prerromanos, romanos y medievales de distinta procedencia de la Península Ibérica y, el contenido en fósforo, es muy parecido ^[121-124]. Por tanto, la afirmación de autores como Verhoeven y sus colaboradores, en la que aseguran que las espadas que presentan la mayor calidad estética en sus bandas de carburos de hierro proceden, muy posiblemente, de lingotes wootz de Hyderabad en India, no es correcta; ya que el fósforo tiene una fuerte presencia en la madera de casi todos los árboles de cualquier localización geográfica y, no es una impureza típica de los minerales de hierro, independientemente de su procedencia. Recordemos también cómo, el geógrafo andalusí al Idrisi (1100-1166) ^[72], cuenta que en Malindi y Mombasa (Kenia) y, en Sofala (Mozambique), se obtenía el mineral de hierro con el que se fabrican las espadas de India, famosas en el mundo entero. Por tanto, la procedencia única de Hyderabad (India), de los lingotes del mejor wootz queda descartada. Deben ser otras las razones de la calidad de las bandas de carburos en las espadas de Damasco. Para terminar, en las fundiciones blancas fosforadas actuales, donde el fósforo puede alcanzar contenidos de alrededor del 2% en masa, la influencia de esta fuerte presencia es para dar gran colabilidad al caldo; pero no influye en la estructura dendrítica de la fundición blanca, en la que el fósforo aparece en los espacios interdendíticos asociado a la ledeburita, formando el eutéctico ternario esteadita ^[125].

Esta suposición de algunos científicos en la creencia de que los mejores wootz procedían de India y, más concretamente de Hyderabad, llevó a C.C. von Schwartz, siderúrgico austriaco, a publicar en 1901, en la prestigiosa revista alemana “Sthal und Eisen”, los análisis realizados a minerales de gran pureza procedentes de India, exactamente de los minerales magnéticos de Pipugaon en el distrito de Chanda y de Singareni, en el distrito de Hyderabad ^[51]. Los resultados fueron los siguientes:

<u>MINERAL DE SINGARENI</u>	
<i>Compuesto</i>	<i>% en masa</i>
Peróxido de hierro (magnetita)	94´5
Sílice (SiO ₂)	4´5
CaCO ₃	0´6
Mn ₂ O ₃	-
Al ₂ O ₃	trazas
MgCO ₃	-
Azufre	-
Ácido fosfórico	-

<u>MINERAL DE HEYDERABAD</u>	
<i>Compuesto</i>	<i>% en masa</i>
Peróxido de hierro (magnetita)	92´92
Sílice (SiO ₂)	4´19
Azufre	0´05
Fósforo	Trazas
Humedad	2´47

Con todas las precauciones que se quieran, para unos análisis realizados en 1901, queda constancia de que los minerales de India y, más concretamente, de Hyderabad, no eran muy distintos de los de otros lugares, y su contenido en fósforo, ni siquiera, destacable. El fósforo entra en el hierro y acero por difusión a través del carbón vegetal.

Siguiendo con Verhoeven y colaboradores, afirman que las secciones longitudinales y transversales de una hoja de acero de Damasco, revelan que las partículas de cementita están dispuestas en planos casi paralelos al plano de forja de la hoja. Sobre la superficie, los planos se espacian una distancia S , mientras que la separación perpendicular, S_p , es mucho más pequeña (Figura.43).

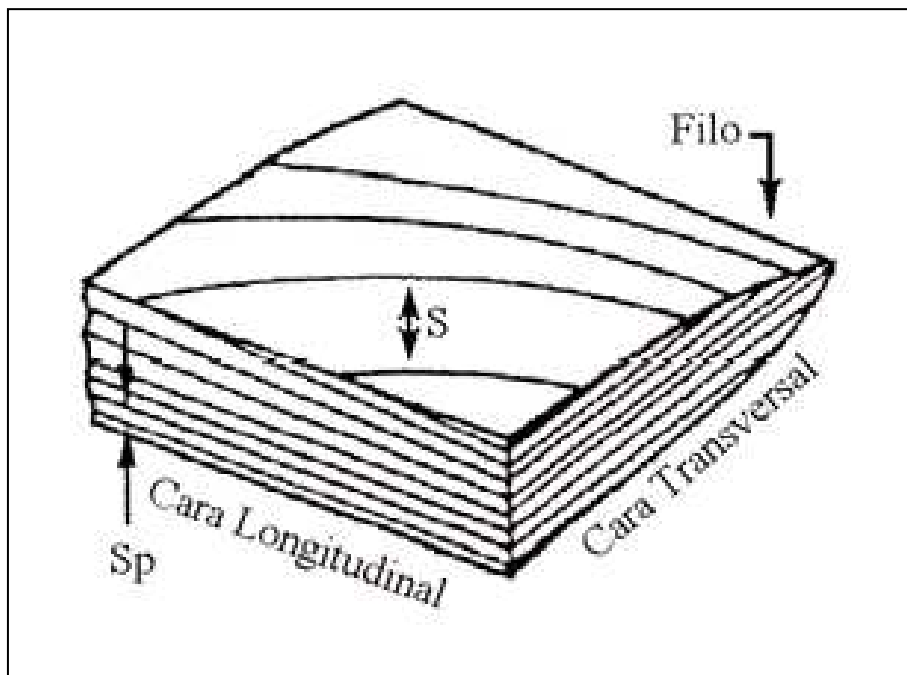


Figura. 43: Esquema de las bandas de cementita formadas en las hojas de un acero de Damasco después de la forja, según Verhoeven y colaboradores ^[29].

Para un valor S_p dado, el valor de S puede variar ampliamente debido a los pequeños cambios en los ángulos relativos de la superficie plana con los planos de las láminas de cementita, lo que trae consigo los grandes cambios en el espaciado S de las bandas.

Según la opinión de Verhoeven y colaboradores, las hojas de acero de Damasco, fueron forjadas a rangos de temperatura comprendidos entre los 750°C y los 850°C, a partir de lingotes wootz provenientes de India. A estas temperaturas, las partículas de cementita son estables y, en el proceso de forja, se disponen en una estructura en láminas paralelas al plano de la hoja de acero. La textura característica de las hojas, fácilmente visible a primera vista, se debe al hecho de que la aleación se enfría lentamente en el crisol, desarrollando una estructura con grandes cristales dendríticos, con los espacios interdendríticos llenos de carburos eutécticos (ledeburita).

Hay una contradicción entre lo descrito anteriormente y su opinión sobre cuales tipos de carburos son los causantes de la aparición de las bellas aguas de estas hojas de acero. Así, según Verhoeven y colaboradores, la formación de cementita proeutectoide en límite de grano austenítico (GBA: Grain Boundary Allotriomorph), se consigue mediante enfriamientos lentos, evitando de esta manera, la aparición de cementita laminar tipo Widmanstätten. Verhoeven y colaboradores, recalcan su idea de que la segregación en los límites de grano de elementos como fósforo y azufre, favorece la nucleación de cementita GBA, provocando, por tanto, el crecimiento de este tipo de cementita.

Queda claro que, para estos autores, la presencia masiva y de gran tamaño de la cementita proeutectoide, en los límites de grano de la austenita, es la causa principal para que se produzcan las bellas aguas de acero de Damasco durante la forja en caliente.

Todo esto no se sostiene y, en la práctica se ha podido comprobar que, estos autores han conseguido forjar el acero de Damasco, pero no reproducir sus hermosas aguas tan características en las hojas de acero de los talleres persas.

Además, Verhoeven y colaboradores, recomiendan dar un tratamiento térmico de calentamiento de estos aceros, antes de la forja, de 1200°C durante 16 horas, con un posterior enfriamiento lento. Aseguran que el espaciado S_p , después de este tratamiento, es de 90 μm , aproximadamente.

Esto es un error; ya que un recocido prolongado a alta temperatura puede conseguir granos de austenita de esos diámetros, pero el espesor de la cementita en límite de grano aparecida durante el enfriamiento, tiene valores mucho más bajos, lo que trae como consecuencia, distancias entre bandas regularmente visibles; pero en cambio, el espesor de las bandas, debido al tamaño de los cristales de cementita proeutectoide, las hace invisibles o casi invisibles. Existen estos aceros de Damasco con aguas muy poco visibles, que nosotros hemos logrado reproducir también. Pero, eso sí, estos tamaños quedan muy lejos de los valores medidos por nosotros en sables de acero de Damasco del taller de Assad Allâh al-Isfahânî.

En el apartado, ya descrito, dedicado al espesor de las bandas de carburos en el shamshir de Mehemet Alí, los valores obtenidos están muy por encima de los valores discutidos por Verhoeven y colaboradores; ya que se han medido espesores y distancias entre bandas que oscilan entre los 180 μm , en el filo y costado del arma y, los 400 μm , medidos en la zona central. Por tanto, valores muy alejados de los que manejan estos autores.

La opinión de estos autores es que la esferoidización final que se observa, en la cementita, es consecuencia de los ciclos de calentamiento y, que está fuertemente influenciada por el trabajo en caliente, de forma que en cada ciclo de forja, es probable que la cementita GBA grosera crezca y que, las finas láminas de cementita Widmanstätten (notablemente más finas) disminuyan de tamaño por el proceso de trabajado. Para ellos, este podría ser el mecanismo por el que se realzan las grandes partículas de cementita, responsable de la estructura del acero de Damasco. Parece claro, para estos autores, que la cantidad relativa de cementita grosera frente a la fina, en una estructura de acero de Damasco, podría depender del número de ciclos de forja empleados, conjuntamente con la temperatura máxima alcanzada en cada uno. A pesar de estos razonamientos, no queda muy clara su opinión acerca de cuál de los dos tipos de cementita posibles, cementita proeutectoide en límites de grano (GBA de los autores) o ledeburítica, es la causante de la estructura final de los Damascos que presentan las típicas aguas. Así, llegan a afirmar que, independientemente de que la cementita final fuese originada desde la cementita dendrítica (ledeburítica) o desde la GBA, la estructura final que presenta las aguas podría depender de la técnica de forja usada por el herrero. De esta afirmación de Verhoeven y colaboradores, se desprende que el conocimiento del mecanismo de la aparición de las típicas aguas de los aceros de Damasco, que las presentan, aún no lo tienen claro ^[38-41].

Otros investigadores que han intentado forjar acero de Damasco partiendo de un acero del 1'6% de carbono en masa, han sido Wadsworth y Sherby ^[42-46]. Para estos autores, el acero se calienta a 900°C durante muchas horas para formar grandes granos de

austenita, enfriando después, lentamente, para formar cementita en límites de grano (GBA de Verhoeven y colaboradores), de forma masiva. A continuación de la forja, esta cementita aparece triturada y disminuida hacia el exterior, acompañada de una distribución más o menos ordenada de planos.

Resumiendo sus aportaciones a este tema de los aceros de Damasco, que presentan bandas de carburos bien visibles, Wadsworth y Sherby, proponen un procedimiento para la forja de estos aceros y que, como en el caso de Verhoeven y colaboradores, utilizan la laminación con los protocolos utilizados con los aceros de herramientas. Este procedimiento se divide en tres etapas:

Primera – El lingote, en este caso un acero con un contenido en carbono del 1'5% en masa, se calienta a temperaturas de alrededor de los 1200°C, durante el tiempo necesario para que los granos alcancen un tamaño grosero.

Segunda – El lingote se enfría lentamente, durante varias horas, con el fin de formar una continua y tupida red de carburos de hierro groseros, en límite de grano. En este momento, se hacen visibles, a simple vista, los límites de grano austeníticos con abundante cementita precipitada.

Tercera– El lingote se calienta entre el rojo sangre y el rojo cereza (650°C-750°C), temperatura a la que la red de carburos de hierro no se disuelve y, el lingote, se trabaja muy bien plásticamente (laminado en este caso); estirando hasta fractura de las bastas partículas de cementita. A estas temperaturas no se presentan dificultades para laminar, debido a que el carburo de hierro es extremadamente plástico en los rangos de temperatura utilizados. Después del trabajo en caliente, la red de carburo de hierro queda rota y triturada y se aprecian, a simple vista, las partículas resultantes.

Los resultados obtenidos por el procedimiento propuesto por Wadsworth y Sherby, están muy lejos de presentar las célebres aguas de los Damascos que las exhiben. Los tamaños de los carburos son muy dispares frente a los legítimos Damascos; presentando, las partículas resultantes de la forja en caliente, una menor esfeoidización. Las partículas de la cementita proeutectoide en límites de grano obtenidas de la fractura por forja están menos alineados en bandas que en los legítimos e históricos. Las partículas de cementita facetadas están, a menudo, rotas y rodeadas de agujeros.

Parece un disparate la 3ª etapa, en la que forjan sin una preparación previa de la estructura. Es imposible forjar con la presencia de cementita continua en límite de grano. Les falta, pues, el recocido de ablandamiento previo de la estructura. Esto contradice todo lo referente a la forja de aceros hipercarburados de herramientas y propone algo que supuso el fracaso de la metalurgia occidental en la forja de los aceros de Damasco. Tal vez, se guardaron un secreto no revelado para preparar el acero para la forja adecuada.

Resulta evidente que consiguen la forja del acero de Damasco pero, su aspecto final y sus características mecánicas, distan mucho de los legítimos aceros de los talleres persas. La laminación automática conforma plásticamente en muy poco tiempo y en pasadas severas, lo que no permite la trituración correcta y globulización de la cementita

proeutectoide, ni tampoco, una alineación contundente de las partículas de esta cementita, sino un reparto casi homogéneo, como ocurre con los aceros de herramientas actuales.

Desde los primeros años de la década de los noventa, Criado y colaboradores ^[47-50] han venido investigando en la forja de estos aceros. La diferencia principal con los investigadores anteriormente comentados, y discutidos, es el enfoque inicial de la investigación. Criado y colaboradores, al contrario que el resto de investigadores, decidieron partir de un estudio arqueométrico de armas fabricadas con acero de Damasco y, a la vez, un estudio exhaustivo de las fuentes históricas, en base a crónicas y publicaciones medievales y modernas. La primera pieza estudiada por estos autores fue el shamshir de Mehemet Alí, salido del taller de Assad Allâh al-Isfahânî, y que se encuentra en el museo del Ejército en Toledo (España). El estudio metalográfico suministró excelente información para la comprensión de las diferentes variables que intervienen en la forja en caliente de este acero.

Obtuvieron lingotes de este acero, fabricados por ACERINOX, S.A., que sirvieron para forjar una espada y varios puñales. Estudiaron su estructura metalográfica y sus propiedades mecánicas de dureza, resistencia y resistencia al desgaste. Estudiaron la influencia que los tratamientos térmicos, previos a la forja, tenían en la estructura final del acero. Templaron con éxito algunos cuchillos, obteniendo excelentes resultados.

En la actualidad, en esta segunda etapa en que nos encontramos, hemos terminado un exhaustivo trabajo de investigación histórica y arqueométrica, con cuyos datos más relevantes hemos llevado a cabo una experimentación, siguiendo los pasos señalados o deducidos de las crónicas, que ha resultado exitosa. Se ha tratado, no sólo de conseguir la forja correcta de estos aceros, sino de intentar conseguir las bandas de cementita que se pudieran ver a simple vista, como en los mejores shamshires de Assad Allâh. La forja correcta, ya la dominábamos y practicábamos, gracias a nuestro maestro herrero Juan Pozón en Córdoba; se ha tratado, en esta segunda etapa, de llevar a cabo de forma correcta, la obtención de los lingotes de acero indio (al-hindi) (wootz), de manera la manera que cuentan las crónicas de al-Kindi, al-Biruni,..., y dar los tratamientos térmicos de recocido de ablandamiento previos adecuados a la forja. La metalografía ha sido el arma indispensable para ir interpretando lo que ocurría en cada paso, y así desvelar, los secretos de este acero; teniendo siempre presente las pautas descritas por los cronistas árabes medievales y los testigos europeos del siglo XIX.

II. PROPUESTA TECNOLÓGICA DE FABRICACIÓN DE ARMAS CON ACERO DE DAMASCO SEGÚN LA INVESTIGACIÓN HISTÓRICA Y ARQUEOMÉTRICA

Después de la investigación histórica y la revisión bibliográfica, con la experiencia de años en la forja de estos aceros, nuestro objetivo final, en la presente investigación, consistió en seguir un procedimiento que se ajustara, según nuestros criterios, al de los fabricantes de armas en acero de Damasco de los talleres persas medievales, en particular, al del maestro herrero, el shamshirsaz Assad Allâh al-Isfahânî. Sin la posibilidad de contar con un herrero con su experiencia, arte y sabiduría en este tema, hemos tratado de llevarlo a cabo artesanalmente, en nuestro laboratorio. Hemos fundido, tratado térmicamente, forjado y laminado artesanalmente con nuestros medios, tan escasos como los del shamshirsaz Assad Allâh, o el maestro herrero Juan Pozón.

El procedimiento se puede expresar, de forma reducida, en las siguientes etapas:

1. Obtención del acero base por fusión de hierro ARMCO y aleantes, y posterior colada.

Se trata de obtener un lingote de hierro similar, en impurezas, a los obtenidos por reducción en los hornos antiguos. Para ello, se utilizó hierro ARMCO, ferrofósforo y otras aleaciones madre como: ferrocromo, ferrosilicio, etc., para obtener un acero de partida, en todo semejante a la analítica del shamshir de Mehemet Alí, fabricado por Assad Allâh.

2. Tratamiento térmico de carburización a alta temperatura en crisol cerrado, con carbón vegetal de madera de encina.

Con este tratamiento, según las crónicas árabes medievales (al-Kindi, al-Biruni, etc.) se trataba de obtener lingotes de acero indio (wootz de al-hind) con contenidos en carbono elevados.

La temperatura elegida, según estas crónicas y las de los viajeros y científicos del siglo XIX, debía ser muy elevada, por lo que se situaría entre los (1270-1370)°C. De hecho, la microestructura de los wootz recuperados muestra, en todos ellos, una estructura dendrítica inequívoca. Esto significa que se situaría en el campo de la austenita más el líquido, en el diagrama Fe-C. La temperatura de carburización, pues, oscilaría en ese intervalo de temperaturas antes citado, siendo más alta o más baja, dependiendo del contenido en carbono alcanzado.

El tiempo fue, según los cronistas árabes medievales, hasta que al agitar los crisoles se notara un claro chapoteo, indicio de que se había producido una fusión parcial, debido al aumento del contenido en carbono del acero al crisol. El tiempo, por tanto, fue de 8 a 12 horas, suficiente para la carburización, fusión parcial y crecimiento de los cristales dendríticos formados. Después, el enfriamiento se hace al aire, como se deduce de las fuentes históricas, ya discutidas con anterioridad.

Este tratamiento, tan peculiar, permite la formación de grandes masas de carburos de hierro ledeburíticos a expensas de la cementita de la austenita. Al enfriar la austenita se transforma a perlita pero con un contenido en carbono inferior al 0,8%. Todo esto supone que en la etapa de forja vamos a disponer de una gran cantidad de cementita,

de tamaño muy grosero y de colonias ledeburíticas muy separadas, para formar las bandas visibles de carburos de hierro. El tamaño y número de los lingotes depende del volumen de la pieza que se pretende forjar. Las crónicas árabes medievales hablan de docenas de crisoles, de los que se obtenían lingotes wootz, de cientos de gramos, siempre inferiores al kilogramo. Esto permite una correcta carburización y el aprovechamiento de la orientación de los cristales dendríticos para la obtención fácil de las bandas visibles de carburos.

3. Tratamiento de recocido subcrítico de ablandamiento del acero.

Se trata de un recocido subcrítico, entre los 760°C y 780°C, para conseguir la globulización parcial de la cementita ledeburítica, según se deduce de las crónicas medievales y modernas. Es un tratamiento aplicado actualmente a los aceros hipercarburados de herramientas antes de su conformación por forja en caliente. El calentamiento a esas temperaturas se debe prolongar de 50 a 72 horas, previo revestimiento del lingote con arcilla refractaria para evitar su decarburación. Se puede realizar una etapa o, hasta en cuatro, según se relata en alguna crónica. Se debe vigilar la posibilidad de deterioro del revestimiento de arcilla.

4. Forja en caliente.

En el intervalo de temperaturas de (650-750)°C, en el rojo sangre, como relatan las crónicas antiguas, se forja en caliente mediante macho pilón y/o laminación manual, inicialmente, y por golpeo con martillo hasta su conformación final.

La temperatura del rojo sangre, (650-750)°C, es la idónea y coincide con las crónicas antiguas y modernas (siglo XIX), ya que en ese intervalo la cementita es superplástica, como han demostrado las experiencias de Verhoeven y colaboradores y, además, no se redisuelve en la austenita. Esto permite su rotura y globulización sin permitir la regeneración de la cementita continua en límites de grano.

Según el tamaño y forma de los lingotes, wootz, se hacía y se hace necesaria una primera etapa de desbaste mediante macho pilón o maza, o cualquier otro método mecánico apropiado. A continuación, la forja se continua con el martillo hasta su conformación final.

5. Temple en distintos medios, agua con sal muera o en aceite, según las crónicas medievales árabes y los relatos de viajeros y científicos del siglo XIX.

El temple sólo se realiza o realizaba para aquellas armas en las que la estética no fuera la única característica destacable del arma. Las no templadas muestran una estética envidiable; bien pulidas o pulidas y atacadas, para mostrar las fascinantes vetas sinuosas de carburos de hierro. La resistencia mecánica y al corte de las no templadas es muy buena. Sin embargo, con el temple ganan mayor resistencia, aunque con una merma evidente de su belleza.

La temperatura de calentamiento debe coincidir con la de forja para no permitir que se disuelvan las bandas de carburos de hierro esferoidizados y así, al templar, sólo lo hacemos con el carbono de la austenita correspondiente al eutectoide. La presencia de carburos de hierro en la matriz martensítica presta una excelente resistencia al corte. No debe olvidarse que, la cementita es el microconstituyente más duro en los aceros al carbono.

Tras el temple es necesario un revenido para endulzar la estructura martensítica y aumentar su tenacidad. Este revenido, como ya ha sido referido, está en algunas crónicas, como la del relato de M. Baker, cónsul británico en Alepo (Siria) en The Annual Register en 1825 ^[119].

6. Desbaste y pulido de las hojas de acero de Damasco.

Esta es una operación trascendental en el acicalamiento de las armas u otros objetos fabricados en cualquier tipo de acero como: aceros de Toledo, aceros francos, katanas japonesas, etc., y más en el acero de Damasco o al-hindi, que hemos podido comprobar en la investigación histórica, cómo brillaban las espadas de este material, incluso, los espejos hechos con él. Es más, para el caso de revelar las bandas de carburo se hace necesario estas operaciones de acicalado. El cónsul británico en Alepo, M. Baker ^[119] cuenta con detalle estas operaciones de una forma exhaustiva y detallada.

En nuestro caso, las operaciones de desbaste y pulido se han llevado a cabo como si de actuaciones para una preparación metalográfica se tratara. Se ha utilizado papel de Buheler de grano 120, 320, 400, 600 y 2000 y, para el pulido, alúmina α (0'3 μm).

El acabado final de estas operaciones se hace para un posterior ataque químico, tanto en el caso de presentar bandas visibles de carburos como si no las presentan, para que su aspecto quede brillante y especular como corresponde a un acero con tanto carburo de hierro.

7. Ataque químico para resaltar las bandas de carburos de las hojas de acero de Damasco.

El ataque químico es para resaltar las bandas de carburos, en aquellos casos en que las presentan, según las recetas extraídas de la investigación histórica y las fórmulas actuales.

En todas las referencias medievales y modernas a este tipo de grabado químico, para resaltar las bandas de carburos, se utilizan reactivos oxidantes en medio ácido. La sal oxidante que aparece en todos los casos es, siempre, un compuesto de hierro. En general, es el sulfato de hierro disuelto en agua, con adiciones de ácidos orgánicos naturales como el málico, cítrico, acético, etc., el reactivo seleccionado para este efecto. La descripción más detallada y precisa vuelve a ser la de M. Baker ^[119], a base de tierra de Damasco o zaj, que no son otra cosa que soluciones de sulfato férrico resultantes de la lixiviación de unas tierras ricas en esta sustancia química, traídas de los alrededores de Beirut, en el Líbano actual.

En nuestro caso, el ataque químico causante del grabado químico de las bandas de carburos, en aquellos aceros que las presentan, se llevó a cabo con Nital (HNO_3/EtOH) al 10% o solución alcohólica ácida de cloruro férrico ($\text{FeCl}_3/\text{HCl}/\text{EtOH}$). El resultado es exactamente el mismo.

Todos los reactivos de ataque recomendados a lo largo de la historia, para el acero de Damasco, han tenido formulaciones misteriosas, como el zaj, ya comentado. Cyril Stanley Smith editó, en 1968 junto con The Society for the History of Technology and The Massachusetts Institute of Technology Press, un libro muy interesante titulado “Sources for the History of the Science of Steel 1532-1786” ^[126]. En él se vierten, traducen y comentan unos libros que supusieron auténticos hitos en la historia del acero:

- “Von Stahel und Eisen”, (anónimo). Nuremberg, 1532. Traducido y analizado por Anneliese G. Sisco.
- “De la Phirotecnia” , Vannoccio Biringuccio. Venice, 1540. Traducido al inglés y analizado por C.S. Smith et al.
- “Magiae Naturalis”, Giovanni Battista de la Porta. Libri Viginti. Nápoles, 1589. Traducido al inglés anónimamente en 1658 (Londres).
- “La Fidelle Ouverture de l’Art de Serrurier”, Mathurin Jousse. La Flèche, 1627. traducido al inglés y analizado por C.S. Smith.
- “L’Art de covertir le fer forgé en acier et l’art d’adoucir le fer fondu, au de faire ouvrages de fer fondu aussi finis que le fer forgé”, René Antoine Ferchault de Réamur. París, 1722. Traducido al inglés por A.G. Sisco.
- “Elementa Artis Docimasticae”, Johann Andreas Cramer. Leyden, 1739. Traducido al inglés por Cromwell Mortimer en 1741 (Londres).
- “Disertatio Chemica de Analysi Ferri”, Torbern Bergman. Uppsala, 1781. Traducido al inglés por C.S. Smith et al.
- “Acier”, Louis Bernard Guyton de Morveau. Encyclopédie Méthodique, Chymie, Pharmacie et Métallurgie. París, 1786. Traducido al inglés por C.S. Smith et al.
- “Mémoire sur le fer considéré dans ses différents états métalliques”, Charles Auguste Vandermonde, Claude Louis Berthollet et Gaspard Mouge. Mémoires de l’Académie Royale des Sciencies, 1788. Traducido al inglés por C.S. Smith.

En ellos se describen fascinantes recetas sobre tratamientos térmicos del hierro y del acero. Además, vienen recetas sobre el ataque químico a los diferentes aceros incluido el acero de Damasco. Las más interesantes son las siguientes:

Según Von Stahel und Eysen:

“Cómo grabar en acero y hierro, o sobre la armadura

Tomar una parte del carbón de leña de madera de tilo triturada, dos partes de vitriolo, dos partes de sal de amoniaco y moler todo con el vinagre hasta que se asemeje a un puré espeso. Cualquier inscripción o diseño que vaya a ser grabado en una pieza de trabajo debe ser escrita o dibujada sobre eso con alambre rojo templado con aceite de linaza. Deje que se seque y luego cubrir su trabajo con una capa de la pasta, del grueso de un dedo meñique, y tener en cuenta que cuanto más caliente, más rápidamente se ataca; tenga cuidado, sin embargo, para no quemar el trabajo. Después que el polvo se haya secado por completo, retírela y limpie el diseño.

O: tomar dos partes de verdigris y una parte de sal común; moler, todo en un mortero, añadir el vinagre fuerte, y luego proceder como antes.

O: tomar vitriolo, alumbre, sal, vitriolo blanco, vinagre, y el carbón vegetal de madera de tilo, y proceder como antes.

O: tomar dos partes de vitriolo y un tercio de parte de sal de amoniaco; moler todo en una losa de piedra con la orina. Use esto como se describe anteriormente, salvo que la mezcla se debe utilizar en frío y el trabajo se debe mantener en un sótano durante cuatro o cinco horas.

Otro método de grabado de las aguas que es utilizado:

Tomar partes iguales de verdigris, sublimar el mercurio, el vitriolo y alumbre, todo bien picado. Coloque todo en un frasco de vidrio y dejar reposar durante medio día, revolviendo frecuentemente. Luego tomar la cera, o masicote mezclado con aceite de linaza, o una mezcla de plomo rojo y aceite de linaza, y con ello escriba en la pieza de trabajo cualquier inscripción que quiera grabar; luego aplique el agua con un cepillo. Se deja reposar durante medio día. Si el grabado es muy profundo, dejar reposar durante más tiempo. Si desea grabar una inscripción depresión o el diseño, la capa de hierro o de acero con una capa muy delgada de cera de la inscripción y escribir con un lápiz en la cera hasta el metal; con un cepillo en el agua, que va a comer en él. O sublimar el mercurio en la inscripción que ha rayado con el lápiz, verter el vinagre en ella, y dejar reposar durante media hora.

Otro, más fuerte.

Una media onza de verdigris, un cuarto de onza cada una de alumbre de pluma, sal amoniaco, tártaro, el vitriolo y la sal común, todo bien picado y mezclado. Vierta vinagre fuerte en esta mezcla y dejar reposar una hora. Si la pieza de trabajo va a tener una inscripción plateada, inscribir con aceite de linaza y masicote y deje que se seque. Calentar el agua en un recipiente de cristal, manténgalo en el fuego, y sostener la pieza de acero o de hierro sobre el buque. Vierta un poco de agua caliente sobre ella con una cuchara para que el agua corra de vuelta en el recipiente. Haga esto durante un cuarto de hora, y luego repasar con cenizas o con cal viva. Mirad que éste fondo esté cubierto con petróleo y óxido de plomo donde va o no a ser grabado”.

Según Biringuccio:

Otros secretos son los templados varias veces con agua, jugos de hierbas o aceites. En estas cosas, así como en el agua común, es necesario entender bien los colores que se muestran y durante el enfriamiento. Es necesario saber cómo disponer para que adquieran estos colores, así en frío, de acuerdo con el trabajo y la finura del acero. Debido a que el primer color que muestra el acero cuando se apaga mientras que el fuego es de color blanco, se llama de plata; el segundo que es de color amarillo como el oro que llaman de oro; el tercero que es azulado y púrpura que ellos llaman violeta; el cuarto es gris ceniciento. Apague en la fase adecuada de estos colores a medida que los quiera más o menos duros en el temple. Si desea que sea muy duro, caliente el hierro muy bien y apáguelo rápidamente en los baños de temple que ha preparado o en el agua clara y fría.

Biringuccio describe la soldadura de hierros con una aleación de plata y una base de bórax o flujo de vidrio, suavizado por recubrimiento con una composición de aceite,

vidrio, álcali, y el estiércol y ponerlo en un fuego que le permita sacar; lo grabado con "agua" hecha de sal amoníaco, sublimado corrosivo, verdigris, y la hiel disuelta en vinagre. Describe dorados y damasquinados, y concluye:

Así, en conclusión, me parece un arte que abarca un gran conocimiento, porque no sé de ningún arte o actividad, con exclusión de las ciencias y la pintura, que no necesita esto como su miembro principal. Por lo tanto, en mi opinión, si no fuera por la nobleza del material, yo diría que el trabajo del herrero sobre el hierro, justamente, debe prevalecer sobre el orfebre debido a la gran ventaja que aporta.

Según Della Porta:

Capítulo IX

Cómo se pueden hacer cuchillos de Damasco

Ahora, siendo así que hice allí operaciones muy agradables, a saber, cómo cuchillos de Damasco se pueden tratar para recuperar sus marcas y cómo se llevan a cabo, y ahora las marcas de la fama se pueden hacer en otros cuchillos. Si, pues, se pueden renovar las marcas onduladas en cuchillos de Damasco; que se llevan a cabo, pulimento el puñal, espada o cuchillo, muy bien con polvo de esmeril y aceite, y luego limpiarlo con tiza, que ninguna parte quede oscura, pero que debe brillar todo; luego mojar todas con zumo de limón mezclado con agua. El ataque químico se hace con vitriolo, así cuando se seca, las marcas estarán todas en sus lugares, y las ondulaciones (olas) como lo hacían antes. Y si se quiere hacer marcas con cuchillos de Damasco, exactamente, como pueden hacerse en los auténticos cuchillos de Damasco; se pule el cuchillo muy bien, con tiza como he dicho antes. A continuación, con agua y tiza se extiende una película sobre la superficie del cuchillo. Se dibujan las líneas onduladas y después se introduce el cuchillo en el vitriolo disuelto en el agua. Donde la tiza ha desaparecido se pone negro.

Todas estas recetas han sido probadas en esta investigación, con algunas matizaciones y, sin excepción, han resultado muy positivas. Hemos preferido el Nital y la solución alcohólica ácida de tricloruro de hierro, por su facilidad de preparación y su buena eficacia.

III. TÉCNICA EXPERIMENTAL

III. 1.- Obtención del acero base

Se trata de la primera operación en la fabricación y forja del acero indio (acero de Damasco). En la época medieval y moderna, este acero base, se obtenía por reducción de minerales de hierro: magnetitas y hematitas, con carbón vegetal, como ya quedó descrito en la introducción de esta tesis (apartado I.2, pág. 69).

En nuestro caso, hemos tenido que obviar esta etapa por razones técnicas; aunque se hizo una experiencia en un horno de mampostería, enlucido por dentro con cemento de arcilla refractaria, de 40 centímetros de diámetro y 60 centímetros de alto, y que resultó exitoso, aunque la pella (lupia) obtenida apenas pesó 300 gramos. Cantidad del todo insuficiente para nuestras experiencias.

Hemos tratado de llegar al metal en origen, bien de India, de África o de otras procedencias; reproduciendo esos hierros originales. Se obtuvieron hierros de composición similar a los antiguos y, también, acero de Damasco directamente como, para este caso, lo han hecho los autores ya discutidos anteriormente: Verhoeven y colaboradores, Wadsworth y Sherby y otros. Esto sirve para comparar las bondades de un acero obtenido así y los que se obtienen por carburización en crisol cerrado, a altas temperaturas.

III.1.a.- El horno eléctrico

Para la obtención de hierros, y acero de Damasco directo, se ha empleado un horno de fusión de alta frecuencia con crisol cerámico, o de grafito, y molde (lingotera) incorporado al sistema (Figura.44). Presenta un sistema eléctrico que controla el proceso y un sistema cerrado de refrigeración de agua. Se trata de un horno TAYLORMADE INDUCTION de 10 centímetros de diámetro y 40 centímetros de longitud, cuya capacidad máxima son 8 kilos de acero, aproximadamente, y tiene una potencia de 30 Kilovatios.

El molde o lingotera se calienta antes de la operación de colada por calentamiento mediante combustión de gas.

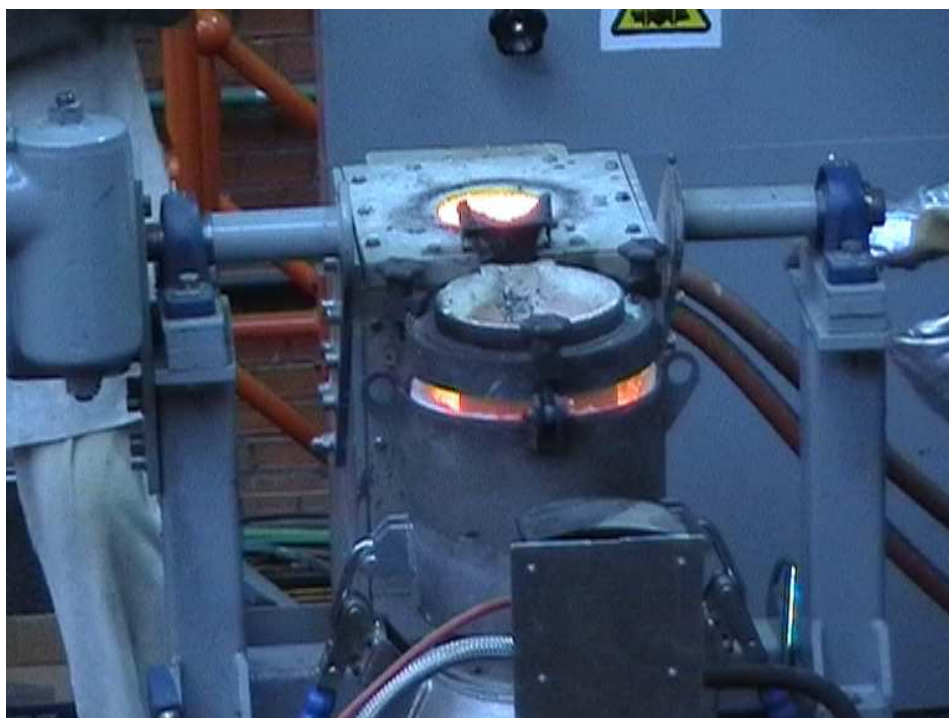


Figura.44: Horno eléctrico de alta frecuencia utilizado en la obtención de hierros y acero de Damasco directo. El molde o lingotera se caldea por combustión de gas.

III.1.b.- Materiales de partida

El hierro base, utilizado para obtener las distintas calidades de acero de partida, ha sido el hierro ARMCO (Figura.45).



Figura.45: Materiales de partida: barras de hierro ARMCO de, aproximadamente, 70 centímetros de longitud, y ferroaleaciones.

<i>Elemento</i>	<i>%, en masa</i>
C	0'004
Si	0'000
Mn	0'04
Ni	0'013
Cu	0'007
Cr	0'001
P	0'000
Fe	99'9

Composición del hierro ARMCO

Además de este hierro, se han añadido partes proporcionales ajustadas de ferroaleaciones de níquel, cromo, vanadio, etc.

Algo que para la literatura técnica y científica es de vital importancia para obtener, durante la forja, las bandas visibles, ha sido la adición de fósforo hasta los valores que se encuentran en los análisis químicos de los aceros de Damasco publicados. El ferrofósforo utilizado tenía la siguiente composición:

<i>Elemento</i>	<i>%, en masa</i>
C	0'054
Si	1'89
Mn	5'70
P	24'7
Fe	67'3

Composición del ferrofósforo

En la obtención del acero de Damasco directo se empleó grafito del 99.99% de pureza.

III. 1.c.- Fusión y colada: acero de Damasco directo y acero suave

En primer lugar, se fundieron barras de hierro ARMCO (C: 0'004; Si: 0'00; Mn: 0'04; Ni: 0'013; Cu: 0'007; Cr: 0'001; P: 0'00; Fe: 99'9); una vez fundido el metal, se añadieron las ferroaleaciones, exceptuando la de ferrofósforo que se depositó en el fondo del molde (lingotera) para evitar pérdidas y su flotación (Figura.46).



Figura.46: Se observan dos barras de hierro ARMCO, en el crisol, en el momento de comenzar la fusión.

En el caso de la obtención del acero de Damasco directo se añade, también, grafito, en la cantidad adecuada, en el molde o lingotera precalentada, junto con el ferrofósforo, antes de la colada. Así se evita el quemado de éstos y su flotación en la superficie del hierro fundido.

Una vez fundido el hierro ARMCO, con los microaleantes disueltos, se pasa a la etapa de colada. Se vuelca el conjunto del horno con su crisol y se cuela en el molde lingotera precalentada, en el que se hace depositado el ferrofósforo y/o el grafito, según se trata de un hierro, un acero suave o del acero de Damasco directo (Figura.47 y 48).

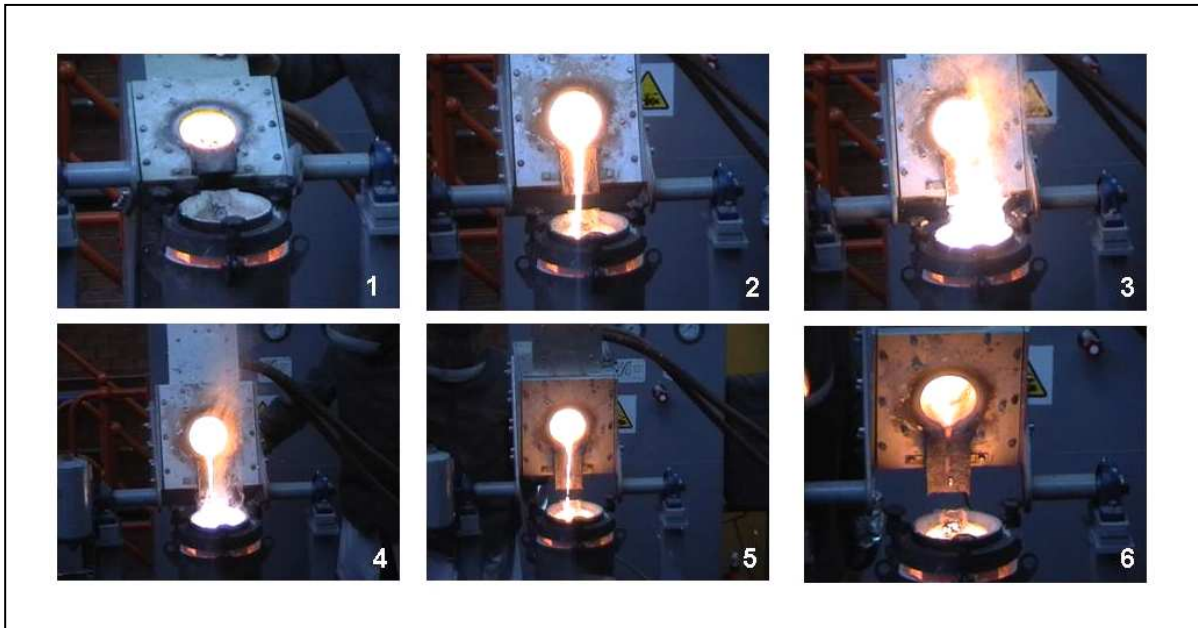


Figura.47: Imagen del chorro de acero colando en el crisol (molde), precalentado por combustión de gas.



Figura.48: Imagen del crisol con el acero todavía al rojo.

Una vez frío el molde o lingotera, se extrae el lingote para pasar a las operaciones posteriores (Figura.49). También se obtuvieron coladas con formas de pletina (Figura.50).



Figura.49: Imagen del lingote obtenido por enfriamiento en crisol.



Figura.50: Serie de lingotes de acero obtenidos con formas de crisol y de pletinas.

Para obtener el acero de Damasco directo se fijó, teóricamente, una composición química:

<i>Elemento</i>	<i>%, en masa</i>
C	2'29
P	0'202
Mn	0'096
Ni	0'017
Cr	0'006
Cu	0'009
Si	0'024
Fe	97'34

Composición calculada

<i>Elemento</i>	<i>%, en masa</i>
C	1'85
P	0'21
Mn	0'11
Ni	0'06
Cr	0'15
Cu	0'04
Si	0'03
Fe	97'55

Composición obtenida

Para la obtención de acero extrasuave, que después debía pasar la etapa de carburización, para obtener el acero indio (Damasco), fue más fácil; procediéndose a una ligera carburación con grafito y elevando del contenido en fósforo, hasta los niveles citados en la literatura internacional, mediante ferrofósforo; llegándose a una composición nominal:

<i>Elemento</i>	<i>%, en masa</i>
C	0'08-0'15
P	0'20
Mn	0'09
Ni	≤ 0'02
Cr	≤ 0'01
Cu	≤ 0'009
Si	0'024
Fe	99'50

Composición nominal

III.1.d.- Corte de los lingotes

Esta operación se hace necesaria para obtener trozos de tamaño adecuado, a la pieza que se quiere forjar y que, por tanto, va a pasar por la etapa de carburización en crisol cerrado. En el caso del lingote de acero de Damasco directo, se corta en trozos de tamaño adecuado a la pieza a forjar, pero sin pasar por la etapa de carburización.

Mientras el acero extradulce obtenido se corta muy bien por cualquier medio convencional: sierra de corte, disco cerámico, etc.; el lingote de acero de Damasco debe hacerse con hojas de sierra especiales de aceros de herramienta muy aleados, con discos de material cerámico abrasivo o discos de diamante. En todo caso, el corte de este acero provoca un fuerte desgaste de las herramientas empleadas, sea cual sea su naturaleza. En épocas antiguas, medievales,..., el corte se realizaba por forja en caliente con la ayuda de martillo y tajadora (Figura.51).

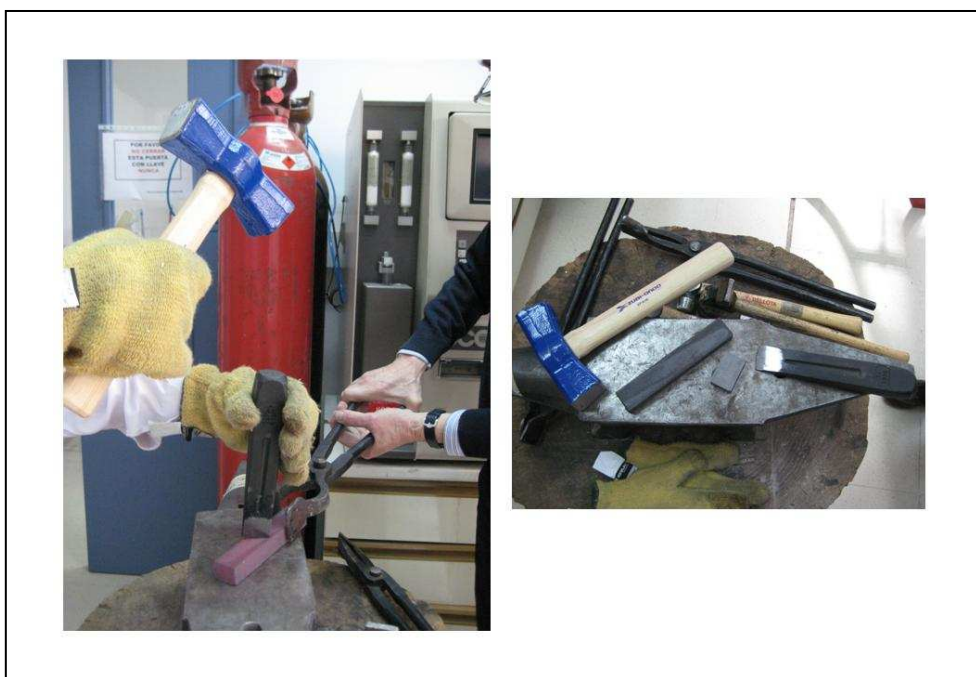


Figura.51: Corte de piezas de acero de Damasco con tajadera en caliente.

III. 2.- Obtención del wootz por carburización a alta temperatura

Esta operación es clave para la obtención del acero indio (al-hindi), base de los demás procesos para la fabricación de armas y otros objetos, con el acero de Damasco. Muy posiblemente, no fue la única manera de obtener este acero de ultraalto contenido en carbono; pero sí que fue el proceso utilizado por los herreros medievales y modernos, tal y como se desprende de las crónicas estudiadas. De hecho, es la única forma de obtener acero de Damasco (al-hindi) con estructura ledeburítica, la más favorable para obtener el aspecto final de las bandas serpenteantes de carburos de hierro.

El acero de Damasco obtenido directamente, como se ha comentado en el apartado III.1.c. (página 90 de esta tesis) no presenta estructura ledeburítica, sino granos equiaxiales perlíticos, dentro de una malla continua de cementita proeutectoide en límites de grano austeníticos.

Las crónicas medievales describen muy bien el proceso, como hemos podido constatar en la investigación histórica. Este proceso de carburización era seguido por todos los herreros, sobre todo, para los wootz procedentes de la India, y los que se fabricaban en Persia, Irak, etc.

Los talleres de Isfahân importaban wootz de la India y, también, los fabricaban con toda seguridad. En las zonas geográficas más alejadas, como Al Andalus, los wootz eran fabricados en esos talleres.

III.2.a.- Horno eléctrico con resistencias de CSi (Carbolite)

El horno utilizado para el proceso de carburización es un horno Carbolite Furnaces Type 15/4B, de 5000 watos de potencia a 380v., el cual puede alcanzar, con eficacia, los 1500°C (Figura.52).



Figura.52: Horno utilizado para la obtención de los wootz por carburización.

III.2.b.- Preparación del crisol cerrado con hierro ARMCO y carbón de madera de encina.

Se corta el trozo de acero suave del tamaño adecuado a la pieza que se pretenda forjar, y se introduce en el crisol cerámico (Figura.53). A continuación, se rellena el crisol con el carbón vegetal triturado hasta un tamaño de partícula de dos centímetros de diámetro medio. Esto es fundamental para que el carbón se queme a alta temperatura en un ambiente muy cerrado con poco volumen de aire, produciéndose monóxido de carbono, que es la sustancia carburizante. Por lo tanto, el carbón que rodea al trozo de hierro no debe estar muy compactado. El carbón vegetal debe llenar hasta las $\frac{3}{4}$ partes del crisol. Para continuar, se añade arena de río de grano fino hasta enrasar el crisol (Figura. 54, 55 y 56).



Figura.53: Se introduce en el crisol el trozo de acero suave de tamaño adecuado.

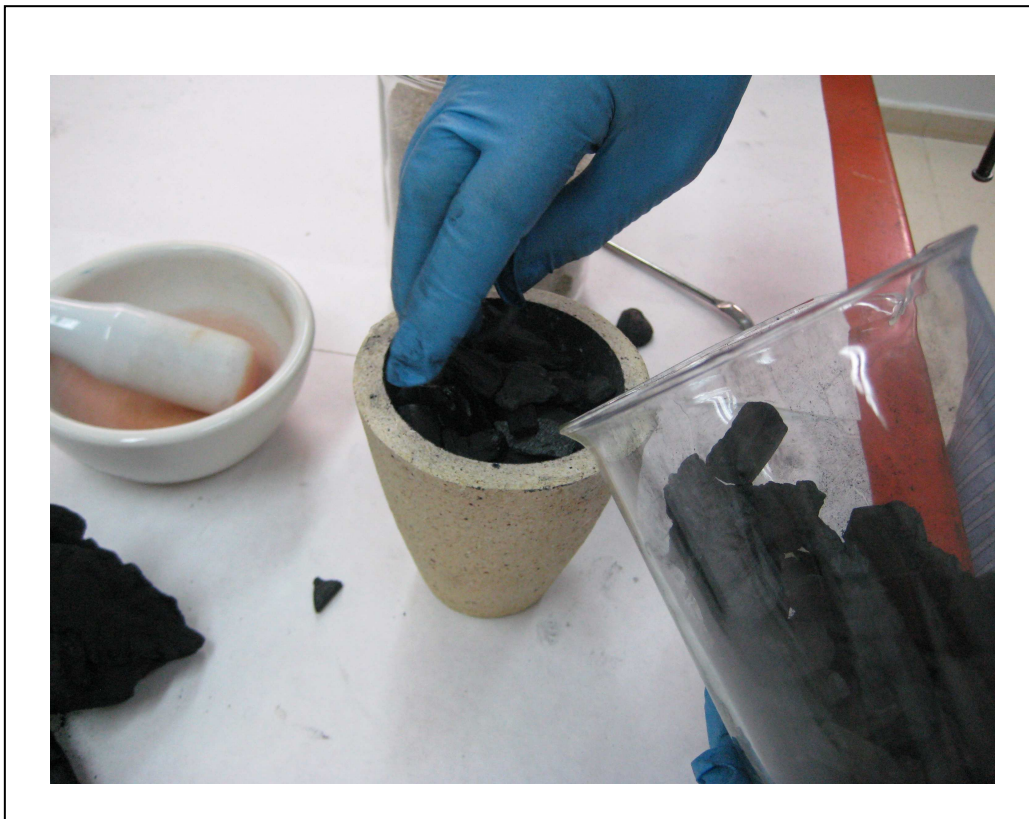


Figura.54: Se añade el carbón vegetal triturado hasta llegar a las $\frac{3}{4}$ partes del volumen del crisol.



Figura.55: Se rellena y enrasa el crisol con la arena de río.

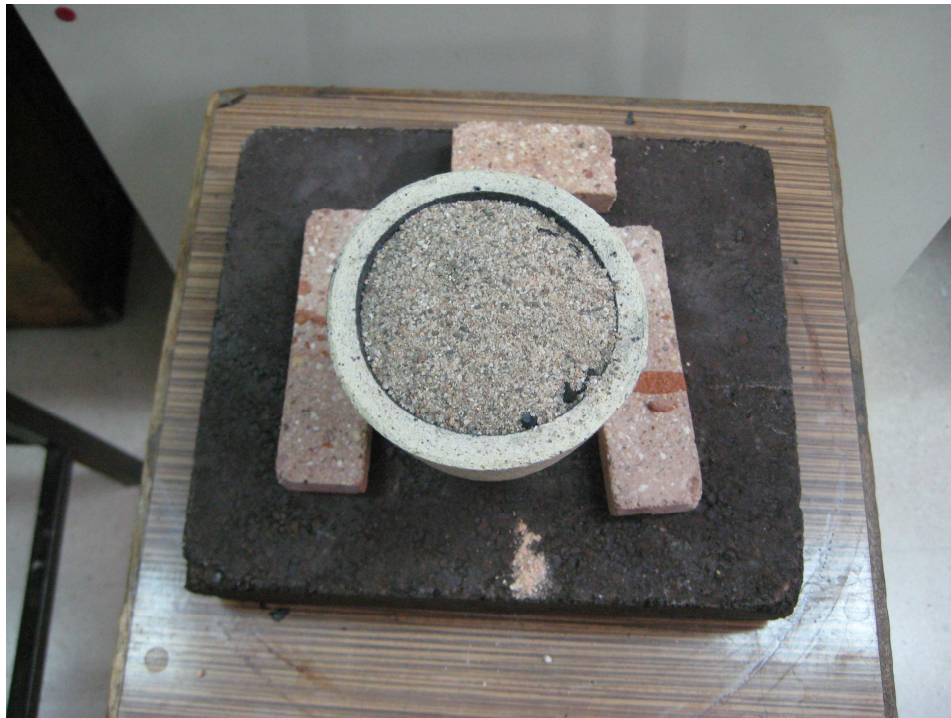


Figura.56: El crisol queda con el lingote y el carbón vegetal sellado con la arena de río

III.2.c.- Introducción del crisol en el horno y calentamiento a 1340°C

Con el horno a la temperatura de carburización (1340°C), se introduce el crisol bien centrado. Se cierra el horno y se deja a esa temperatura entre 12 y 16 horas. Ese es el tiempo necesario para conseguir introducir carbono en el hierro por difusión, hasta un contenido que oscila entre el 1'6% y 1'9% en masa (Figura.57).



Figura.57: Introducción en el horno del crisol sellado a una temperatura de 1350°C durante (12-16) horas.

El resultado final de la operación oscila entre esos valores debido a que no siempre el tamaño y forma de los trozos de carbón son rigurosamente iguales. Numerosos ensayos nos han llevado a esos tiempos que concuerdan, perfectamente, con los datos de los cronistas medievales y modernos.

III.2.d.- Extracción del crisol del horno, enfriamiento al aire y obtención del pequeño lingote por rotura del crisol.

De la misma manera como se describe en las crónicas medievales y modernas, el crisol una vez frío, se rompe. Se extrae el lingote y se puede observar cómo el sellado de la arena vitrificada es hermético y, por otra parte, cómo parte de la carga del carbón vegetal aún se conserva y, además, con la misma textura inicial (Figura.58, 59, 60 y 61).



Figura.58: Apertura del horno donde se visualiza el crisol al rojo blanco.

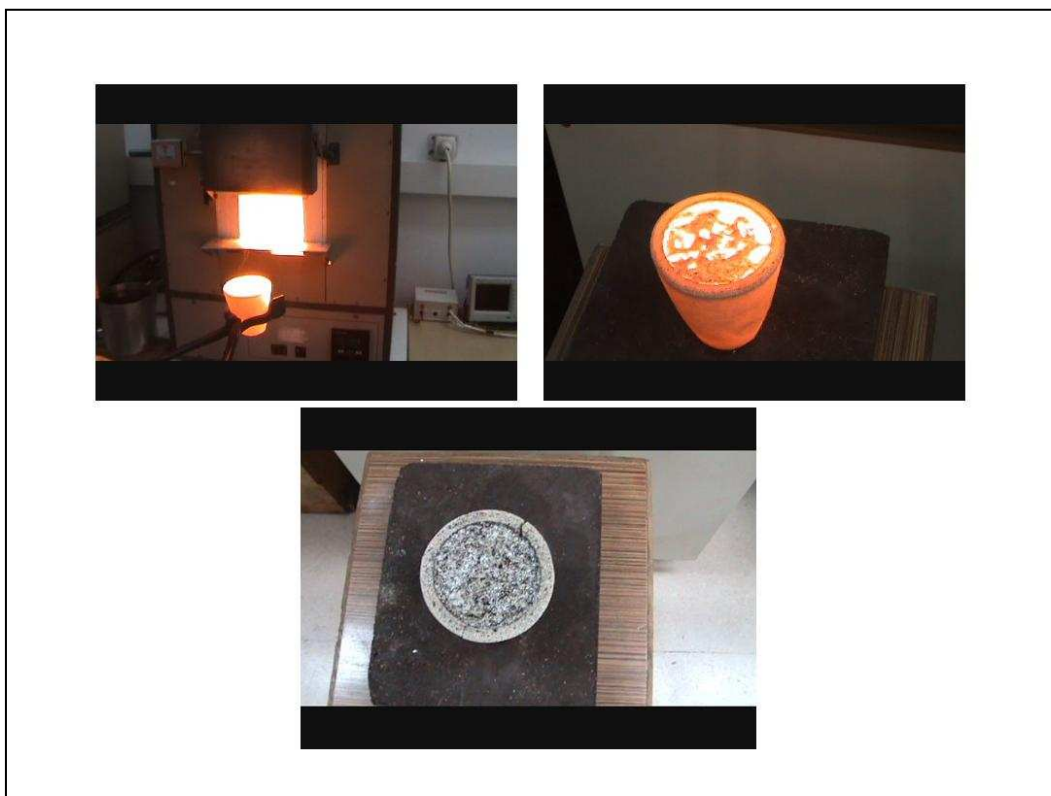


Figura.59: Se retira el crisol del horno y se deposita en la placa refractaria para que se enfríe.

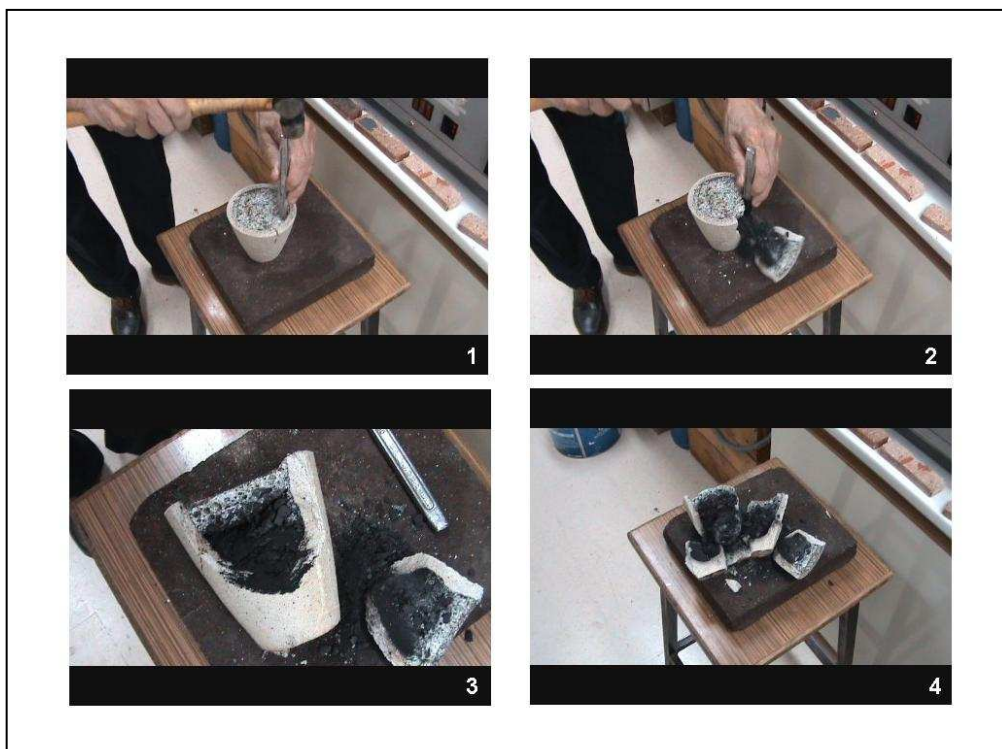


Figura.60: Se rompe el crisol y se observa el lingote, la capa de arena vitrificada sellante y parte del carbón aún sin consumir.



Figura.61: Capa de arena vitrificada sellante del crisol cerámico.

III. 3.- Tratamiento de recocido de ablandamiento del acero del wootz, previo a la forja en caliente

Esta etapa vuelve a ser crucial para la perfecta forja en caliente del acero de Damasco (al-hindi). Éste es uno más de los secretos que posee el rito de forja de estos aceros. Está correctamente descrito en las crónicas y es un tratamiento térmico equivalente al que se realiza en la actualidad con los aceros hipereutectoides de herramienta, antes de la forja en caliente. Asimismo, es el tratamiento que se efectúa antes de la forja de los aceros aleados hipercarburados de herramientas. Por lo tanto, hace muchos siglos que se conoce la manera de forjar aceros de ultraalto contenido en carbono.

III.3.a.- Sellar el pequeño lingote (wootz) de acero de Damasco (al-hindi) con arcilla humedecida (grea).

Este sencillo recurso de revestir con arcilla una pieza de acero para realizarle un tratamiento térmico es, el mismo recurso, que en Japón utilizaban, y utilizan, los maestros herreros para el recocido y temple de las katanas.

Se trata, pues, de envolver el lingote de acero (wootz) con arcilla húmeda (barro o grea) para evitar su oxidación durante el tratamiento térmico de recocido de ablandamiento (Figura.62).

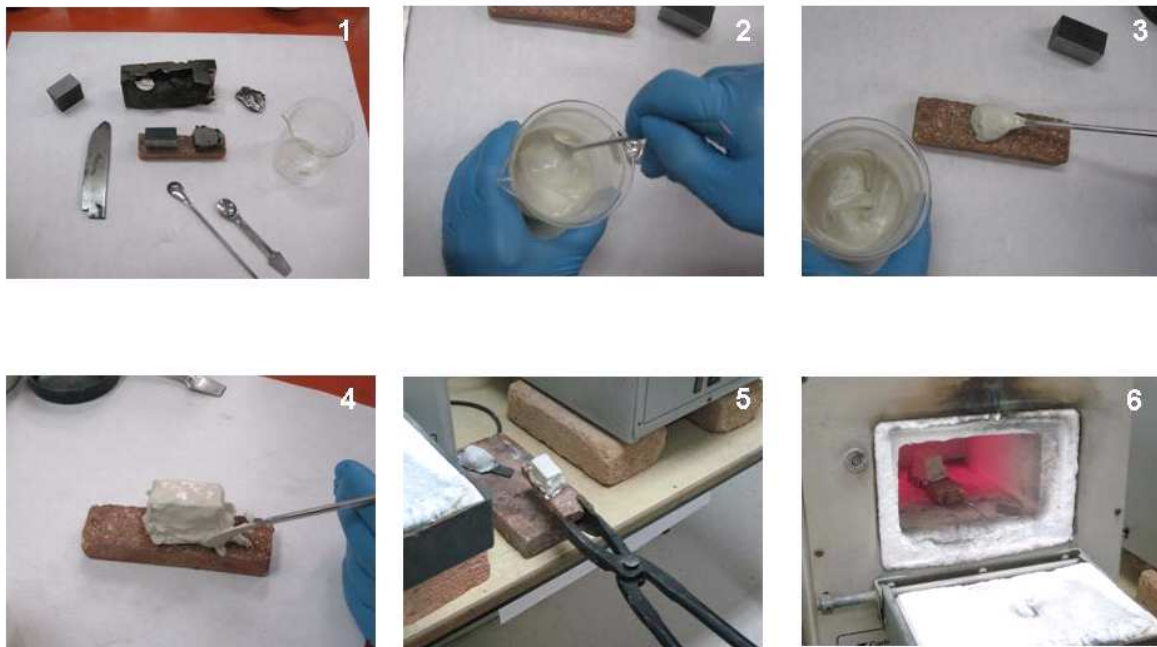


Figura.62: Sellado con mezcla de silicato sódico y caolín de un trozo de acero indio, y su introducción en el horno, para su tratamiento de recocido de ablandamiento.

III.3.b.- Calentamiento del lingote sellado con arcilla en el horno a 780°C durante 48 horas

Siguiendo las recetas de las crónicas, se introduce el lingote sellado con arcilla en el horno a 780°C durante 48 horas. A esta temperatura de recocido subcrítico, la cementita proeutectoide, precipitada en límites de grano o de forma ledeburítica; no se disuelve en la austenita. De esta manera sufre un proceso de globulización muy efectivo, al igual que ocurre en la industria actual con los aceros de herramientas hipereutectoides. Transcurridas 48 horas, se deja enfriar lentamente en el horno, con lo que se producirá, también, una globulización, más o menos completa, de la cementita del eutectoide (Figura.63 y 64).



Figura.63: Sellado con arcilla de una pletina de acero indio y tratamiento de recocido de ablandamiento.

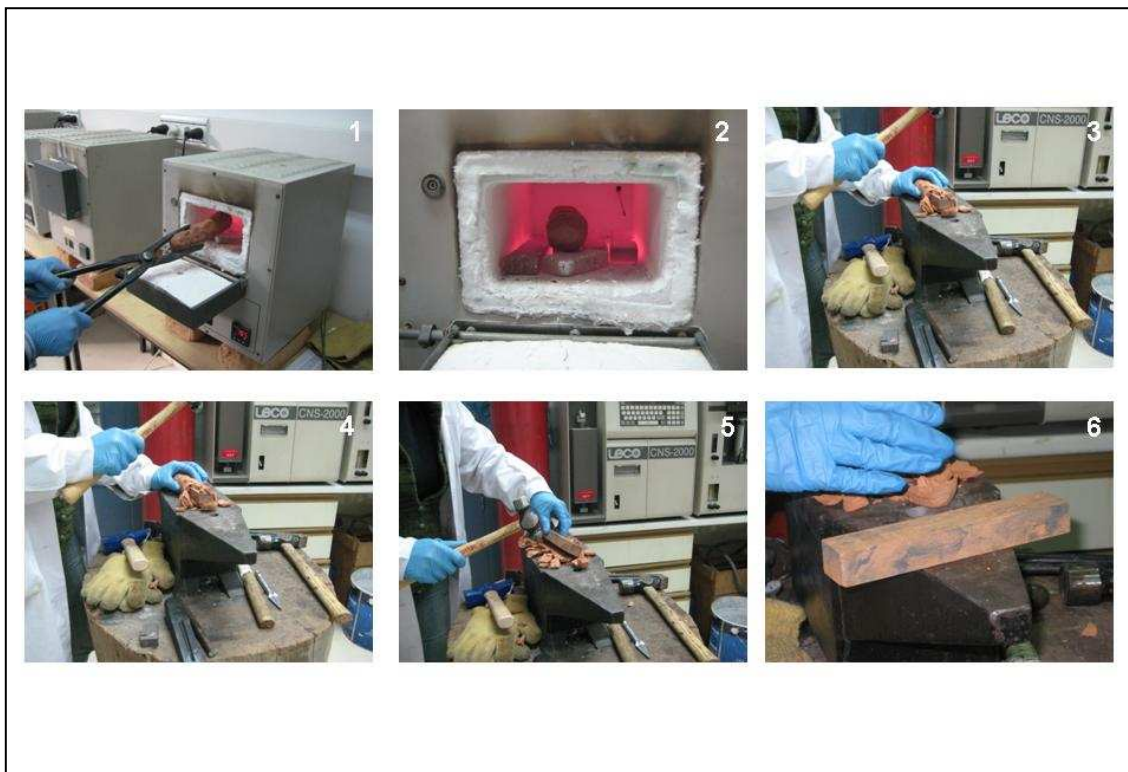


Figura.64: Pletina de acero indio tratada por recocido de ablandamiento liberada de la envoltura de arcilla.

III. 4.- Forja en caliente del lingote de acero de Damasco

Tanto en las crónicas medievales como modernas se describe, detalladamente, la forja del acero de Damasco o acero indio. El dato clave es la temperatura superior de forja; esa temperatura, que no se puede sobrepasar en ningún momento; ya que, de hacerlo, se regeneraría la cementita proeutectoide en límite de grano, durante el enfriamiento. Esto supondría la fragilización de la pieza de acero de Damasco, que se rompería como si fuera barro (Figura.65 y 66). Esta es una de las claves, más evidentes, del fallo continuado de los herreros occidentales a la hora de querer forjar estos aceros. Hecho éste, del que se lamenta René Antoiné Ferchault de Réamur (La Rochelle 1683-Saint Julián-du-Terroux 1757), polímata y físico francés; quién escribe en su obra: “L’art de convertir le fer forgé en acier et l’art de adoucir le fer fondu, au de faire ouvrages de fer foudi aussi finis que le fer forge”, editada en París, en 1722, por P. Brunet, que deplora la habilidad de los artesanos parisinos, ninguno de los cuales lograron forjar una herramienta a partir de una torta de acero de la India (wootz) ^[123].



Figura.65: Trozos de una pletina de acero indio forjada a temperatura inadecuada (superior a 800°C).



Figura.66: Detalle de las grietas creadas durante la forja de acero indio, a altas temperaturas.

No sólo es René Antoiné Ferchault de Réamur quien se queja de esta imposibilidad; también lo hacen otros científicos europeos como se puede comprobar en la obra de C.S.Smith ^[1].

La forja correcta del acero indio (acero de Damasco), después del tratamiento de recocido de ablandamiento, debe realizarse en el intervalo de temperaturas que van desde los 650°C a los 780°C. Cualquier calentamiento superior a esa temperatura, acarrea el riesgo serio de su fragilización.

III.4.a.- Desbaste en martillo pilón neumático

Cuando se parte de un lingote (wootz), relativamente grande (de 0´75 a 1 kg de masa), es interesante desbastar y dar preforma con el martillo (macho) pilón en el intervalo de temperaturas antes señalado. Este hecho, ahorra mucho esfuerzo y tiempo y, se viene haciendo desde tiempo inmemorial. Las diferencias de nuestros martillos pilón actuales y los antiguos es, únicamente, el sistema mecánico de accionamiento. Los actuales funcionan con mecanismos hidroneumáticos o de ballesta, mientras que los antiguos, utilizaban artilugios que aprovechaban la fuerza animal o la fuerza del agua de arroyos y riachuelos (Figura.67).

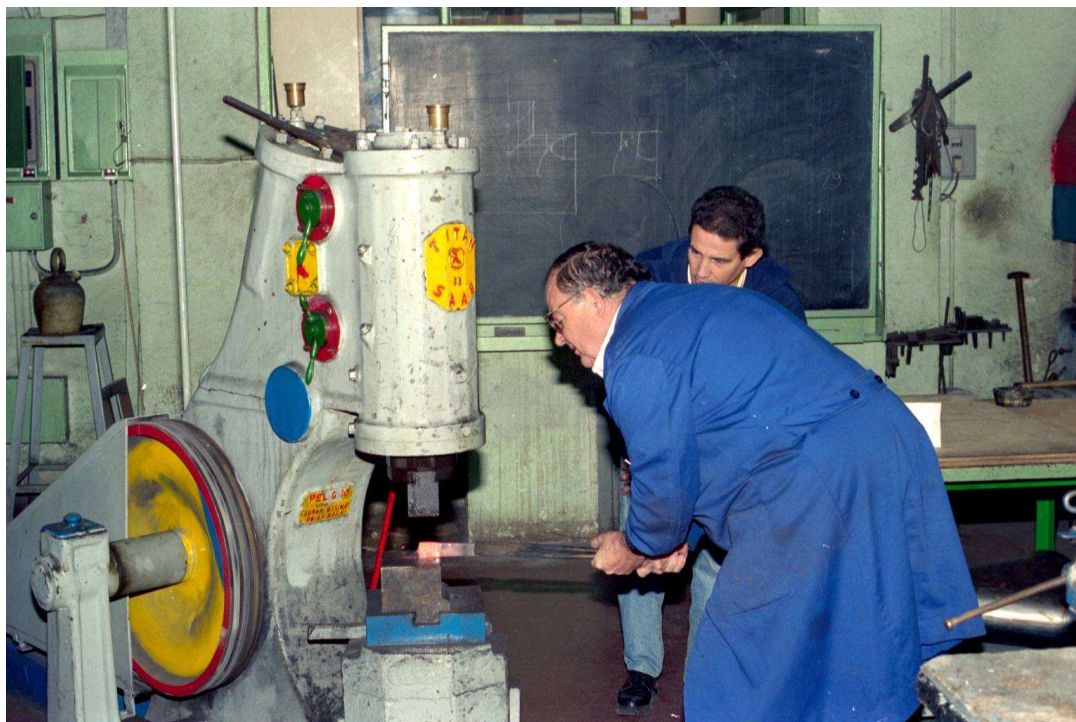
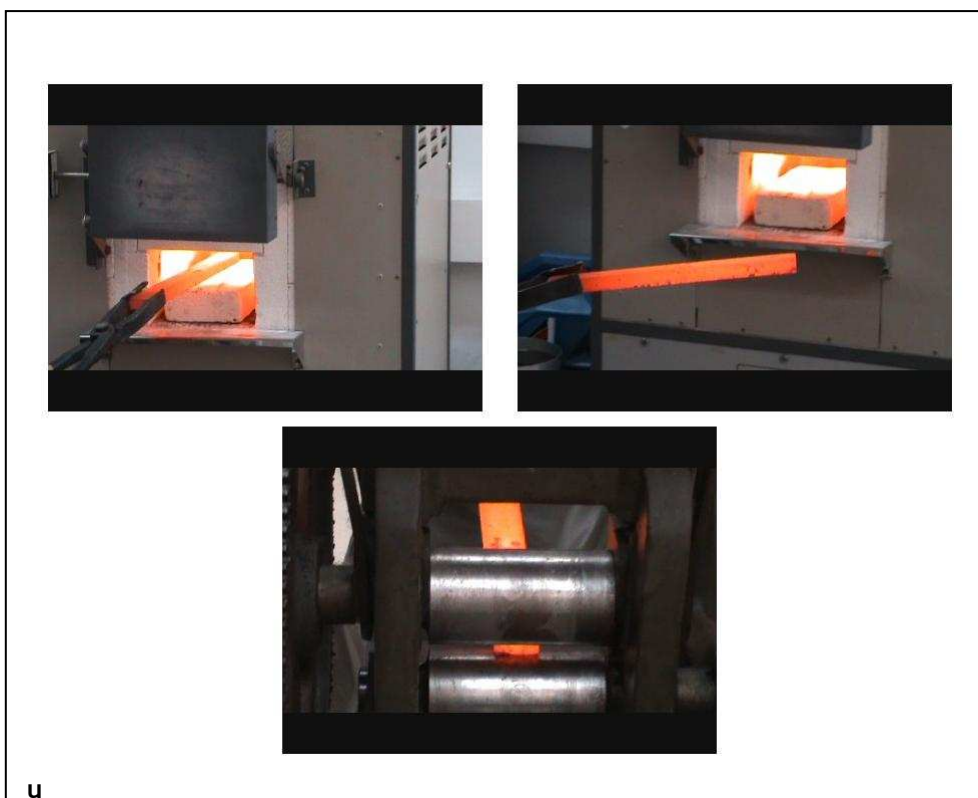


Figura.67: El maestro Florentino Flores (Madrid) acciona su martillo pilón neumático para desbastar una pletina de acero indio.

III.4.b.- Desbaste por laminación manual artesanal

El desbaste por laminación es un recurso muy interesante y eficaz si, previamente, el lingote de acero de Damasco ha sido desbastado y conformado a la forma de pletina.

Con el sistema de laminación hemos conseguido acercarnos a las dimensiones últimas de las piezas forjadas, quedando el martillado para los golpes finales con el fin de conseguir las formas exactas. Sin embargo, las estructuras de las bandas de carburos obtenidas no son iguales a la que se obtienen por martillado exclusivamente. La laminación aplasta y alarga sin apenas recalcar; obteniéndose, como resultado, estructuras de bandas menos retorcidas y más regulares. De esta forma, hemos obtenido un puñal con la “inquietante estructura” en red poligonal que cubre la superficie de la hoja de acero (Figura.68 y 69).



u
r

Figura.68: Se observa cómo se extrae la pletina del horno para introducirla en la laminadora.

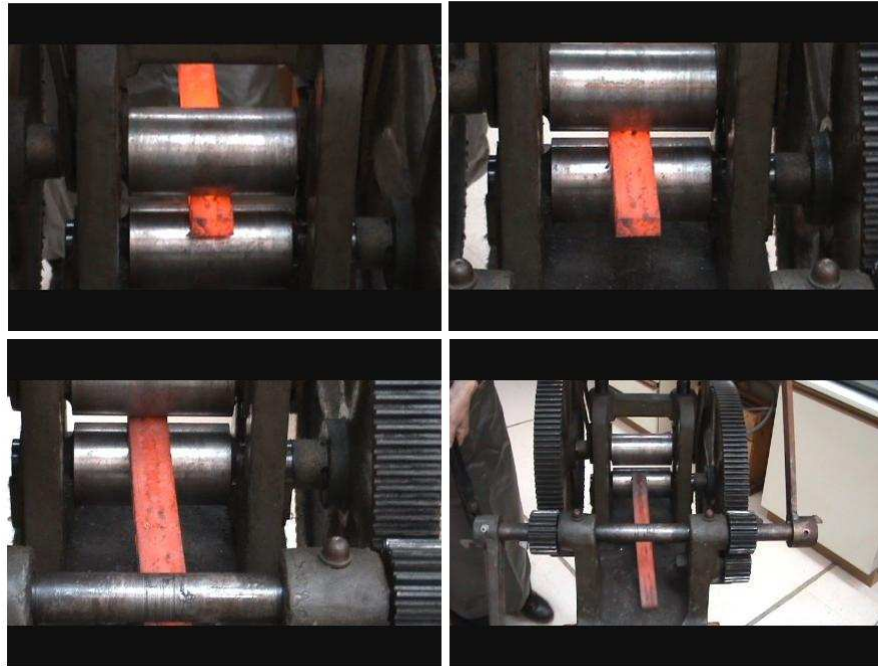


Figura.69: Detalles de la laminación de la pletina

III.4.c.- Forja por martillado en el yunque

Los lingotes de acero indio poseen un volumen que se ajusta a cada pieza que se desea forjar. Son, por tanto, de tamaños reducidos. En la mayoría de los casos, la etapa de desbaste en martillo (macho) pilón no es necesaria; siendo suficiente utilizar la maza de 2 a 3 kilos (Figura.70).



Figura.70: En esta fotografía se observa la utilización de la maza, además, del martillo de forja.

La forja por martillado se debe ejecutar con martillos de $\frac{1}{2}$ kg y de 1 kg de masa. La temperatura, como ya se ha comentado anteriormente, debe mantenerse por debajo de los 780°C , es decir, sin pasar del rojo sangre y rojo cereza. Si la pieza se va retorciendo durante la forja, la estructura de las bandas de carburos de hierro se irán entrelazando y retorciendo, hasta conseguirse las bellas aguas del shamshir de Mehmet Alí (Figura.1, 2 y 3). La aparición de rosetones o escalones (escalera de Mahoma) se deberán conformar en esta etapa de forja, por retorcimientos, cortes o estrangulamientos con la tajadera, etc.

Con el martillo de $\frac{1}{2}$ kg y de $\frac{1}{4}$ kg se finalizará el trabajo, ajustándose a la geometría prevista (Figura.71, 72 y 73).



Figura.71: Martillado de un puñal en acero indio. La forma, ya se ve muy acabada, debido a que es la etapa de enderezamiento, posterior al acabado de los planos en piedra de agua.

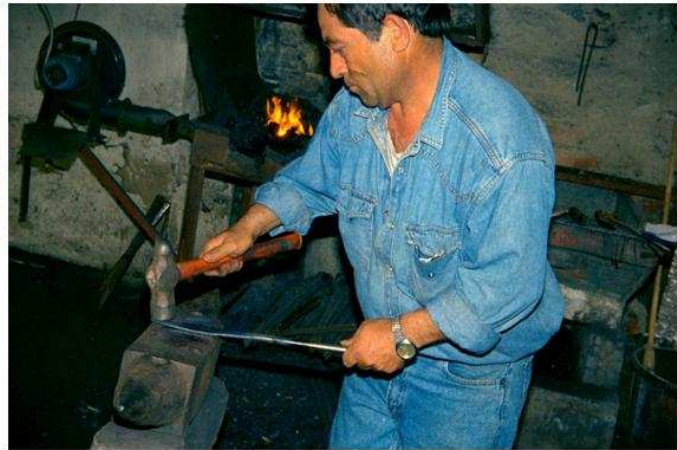


Figura.72: Imágenes de la forja de un puñal por el maestro herrero Juan Pozón (Córdoba).



Figura.73: Después del desbaste en martillo pilón, el maestro Florentino Flores, continúa la forja con el martillo en el yunque.

III. 5.- Temple en distintos medios

El temple era una operación que no tuvo carácter general. Los bellísimos shamshires persas medievales de Isfahân no han sufrido temple. En todos los Damascos con bellas vetas de carburos, examinados y estudiados hasta el momento, en ninguno de ellos se han observado estructuras de temple. Esto no es casual; ya que el temple hace que con el ataque químico final la estructura se ennegrezca y ensucie, como ocurre siempre con las estructuras martensíticas. Por tanto, si se desea una estética excelente, la matriz debe quedar ferrítica. Entonces sí, el oxidante ataca limpiamente la ferrita, dejando en relieve los carburos de hierro. A pesar de no templarse, la resistencia del filo al desgaste queda igual, ya que el carburo de hierro o cementita es el constituyente más duro, de los aceros al carbono, por encima de la martensita.

Sin embargo, son innumerables los aceros de Damasco que no presentaban las bandas de carburos en los que primaba más la resistencia mecánica y la eficacia del arma que una concesión a la estética. Igualmente es cierto que, muy pocos herreros dominaban el arte de obtener hojas de acero de Damasco (acero indio) con esa estética. En todo caso, el temple, debía hacerse desde temperaturas que no implicase la disolución en la austenita del carbono de la cementita proeutectoide. Otra vez estamos ante una situación análoga a los aceros de herramientas, aleados o no, hipereutectoides. Se debe hacer un recocido subcrítico, a temperaturas entre 760°C y 800°C y, después, efectuar el temple en sal muera o en aceite y similares. En las referencias históricas analizadas, vemos que en el caso de lo referido por el cónsul británico en Alepo (siglo XIX), el herrero sumerge el acero al rojo sangre en un líquido aceitoso, mezcla de ricino y otros componentes. Nosotros hemos realizado el temple en agua con sal muera y en aceite (Figura. 74, 75 y 76). Aunque realizamos algunos procesos de revenido, este se demostró como innecesario, ya que al tratarse de aceros de tan alto contenido en carbono, en todas las operaciones de temple quedaba un porcentaje de austenita retenida sin transformar a martensita. Por tanto, el acero de Damasco, después del temple, siempre conserva una aceptable tenacidad debido a la presencia de esta austenita residual.



Figura.74: El puñal al rojo sangre se sumerge en aceite para su temple



Figura.75: Detalle del proceso de temple en aceite.



Figura.76: Se procede al enderezamiento del puñal después del temple.

III. 6.- Desbaste y pulido de las hojas de acero obtenidas

Esta es la operación de acabado fundamental. Téngase en cuenta que entre los maestros japoneses antiguos y actuales, fabricantes de katanas, el maestro pulidor se sitúa en una escala superior al que realiza la forja. Como se ha referido en la investigación histórica, el desbaste y pulido de las hojas u otros objetos, en acero de Damasco era muy cuidadosa y con los métodos más sofisticados. En nuestra investigación después del rectificado de la superficie en el taller mecánico o con piedra de agua artesanalmente, se procedió a su desbaste mediante discos abrasivos en agua de Buheler de grano 240, 320, 600 y 2000. El pulido se realizó en alúmina α ($0.3\ \mu\text{m}$) y alúmina γ ($0.03\ \mu\text{m}$), en paño de pulir Buheler.

III. 7.- Ataque químico opcional para revelar la estructura de bandas de carburos de hierro

Hemos visto en la investigación histórica como, los cronistas andalusíes, comentaban el brillo especular de las hojas de acero indio (al-hindi). Incluso, y no sólo en Al Andalus, se utilizaba el acero indio, o acero de Damasco, para fabricar espejos, gracias a un brillo magnífico blanquecino y transparente. Este hecho fue, asimismo, descrito por Marco Polo, durante su viaje a Oriente, a su paso por regiones de Persia limítrofes con India. Es evidente, que en estos casos, y en ciertos periodos de tiempo y localizaciones geográficas específicas, no se buscó la estética de las bandas serpenteantes de carburos de hierro, bien porque se desconocían, no eran su objetivo, o sólo se buscaba su aplicación mecánica. En todos estos casos, el ataque químico, no puede ser contemplado. La estética final es precisamente el brillo immaculado de un acero hipereutectoide pulido correctamente.

En los casos en que se pretenda resaltar las bandas de carburos, como fue el caso de los aceros persas medievales y modernos de la escuela de Ispahân, éste se realiza con una sustancia oxidante en medio acuoso ácido. En las recetas estudiadas de las crónicas medievales y modernas, siempre aparecen las sales de hierro (Fe^{3+}) en disoluciones acuosas ácidas. En nuestra experiencia particular, hemos utilizado tres reactivos ácidos para el ataque químico de aceros al carbono ferríticos (hipoeutectoides e hipereutectoides), como son: Nital al 4%, cloruro férrico en solución acuosa ácida ($\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$) y cloruro férrico en solución alcohólica ácida ($\text{HCl}/\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$). Con todos ellos el resultado ha sido satisfactorio. Quizás, con las soluciones de cloruro férrico se obtenga ese aspecto, ligeramente gris verdoso, que tanto se aprecia en el mundo de los aceros de Damasco. Los ataques con las formulaciones de las crónicas medievales y modernas, también resultaron exitosas. Con estos ataques, asimismo, se distingue ese tono, sutilmente, gris verdoso.

El ataque debe realizarse con un paño humedecido, pasándolo con suavidad por toda la superficie del arma, con mucha diligencia para evitar que salgan manchas localizadas. Si el paño se pasa con rapidez y suavidad, el ataque químico progresa homogéneamente, obteniéndose la misma tonalidad en toda la superficie atacada. El tiempo depende, solamente, del contraste que se pretenda conseguir; llegado éste a los tres o cuatro minutos, el contraste no mejora y, la insistencia en el ataque, puede provocar el ennegrecimiento del acero (Figura.77, 78, 79, 80, 81).



Figura.77: Puñales de acero de Damasco pulidos sin ataque. Presentan un brillo muy transparente y especular.



Figura.78: Puñal de acero de Damasco atacado con cloruro férrico en solución alcohólica ácida. Se observan las bandas de carburos de hierro en red poligonal.



Figura.79: Puñal de acero de Damasco con bandas de carburos de hierro muy finas, templado y sin ataque.



Figura.80: Puñal de acero de Damasco con bandas de carburos de hierro muy finas, templado y sin ataque.



Figura.81: Puñal de acero de Damasco con bandas de carburos de hierro muy finas, templado y sin ataque.

III. 8.- Técnicas de observación metalográfica

En esta investigación, la metalografía ha sido la base para poder estudiar y comprobar, tanto en las muestras arqueológicas como en las fabricadas en nuestro laboratorio, los diferentes tratamientos termomecánicos aplicados a los aceros de Damasco.

III.8.a.- Corte de las muestras y preparación metalográfica

Tanto las piezas originales como las fabricadas en el laboratorio han podido ser observadas en microscopía óptica convencional, sin necesidad de extraer muestras. Se colocaron, directamente, los puñales y espadas sobre la platina del microscopio Olympus BHM, de tipo universal, sujetándolos con plastilina, después de conseguir la axialidad de la superficie a observar, mediante una pequeña prensa manual. En ocasiones, debido a la longitud de las piezas observadas, fue necesaria la sujeción complementaria con una torre y pinzas de laboratorio (Figuras.82 y 83). La micrografías fueron obtenidas mediante una cámara digital Canon IXUS 75, ajustada mediante un soporte especial a uno de los oculares del microscopio óptico (Figura.84).



Figura.82: se equilibra el puñal y se produce su axialidad mediante una prensita manual, adhiriéndose al soporte mediante plastilina.



Figura.83: se coloca el soporte con el puñal sobre la pletina del microscopio óptico y se procede a su observación metalográfica.



Figura.84: para obtener las micrografías ópticas se ajusta, mediante soporte regulable en x e y, la cámara digital a uno de los oculares del microscopio óptico.

En aquellos casos en que las muestras podían o debían ser cortadas, se realizó esta operación; siendo, en algunos casos, necesaria su embutición en resina de dos componentes Résine Mécaprex KM-U de Presi.

III.8.b.- Microscopia Óptica Convencional

Debido al tamaño de las estructuras observadas, que pueden ser contempladas, en ocasiones, a simple vista, la microscopia óptica convencional fue la herramienta fundamental. Se han utilizado una lupa Karl Zeiss Stemi DV4 (x8-x32) y un microscopio Olympus ya descrito. El microscopio lleva incorporado, además de la óptica convencional, campo oscuro, luz polarizada, filtros, etc.

Las muestras observadas se extrajeron de las piezas arqueológicas o fabricadas en el laboratorio, siendo previamente embutidas o no, desbastadas mediante papeles de desbaste de Buheler de grano 240, 320, 600 y 2000, pulidas con paño de pulir de Buheler con alúmina α ($0.3 \mu\text{m}$) de Buheler y atacadas con Nital al 4% o solución alcohólica acidulada con HCl de FeCl_3 .

En otros muchos casos, las muestras fueron observadas directamente en microscopia óptica sin necesidad de extracción previa de muestras, como ya se ha descrito anteriormente.

III.8.c.- Microscopia Electrónica de Barrido

Para la observación en microscopia electrónica de barrido fue necesaria la extracción, cuidadosa y precisa, en el taller mecánico de la Universidad Complutense de Madrid, de las muestras de las piezas arqueológicas (históricas) estudiadas (Figura.85) y, también, de los ejemplares fabricados en el laboratorio.

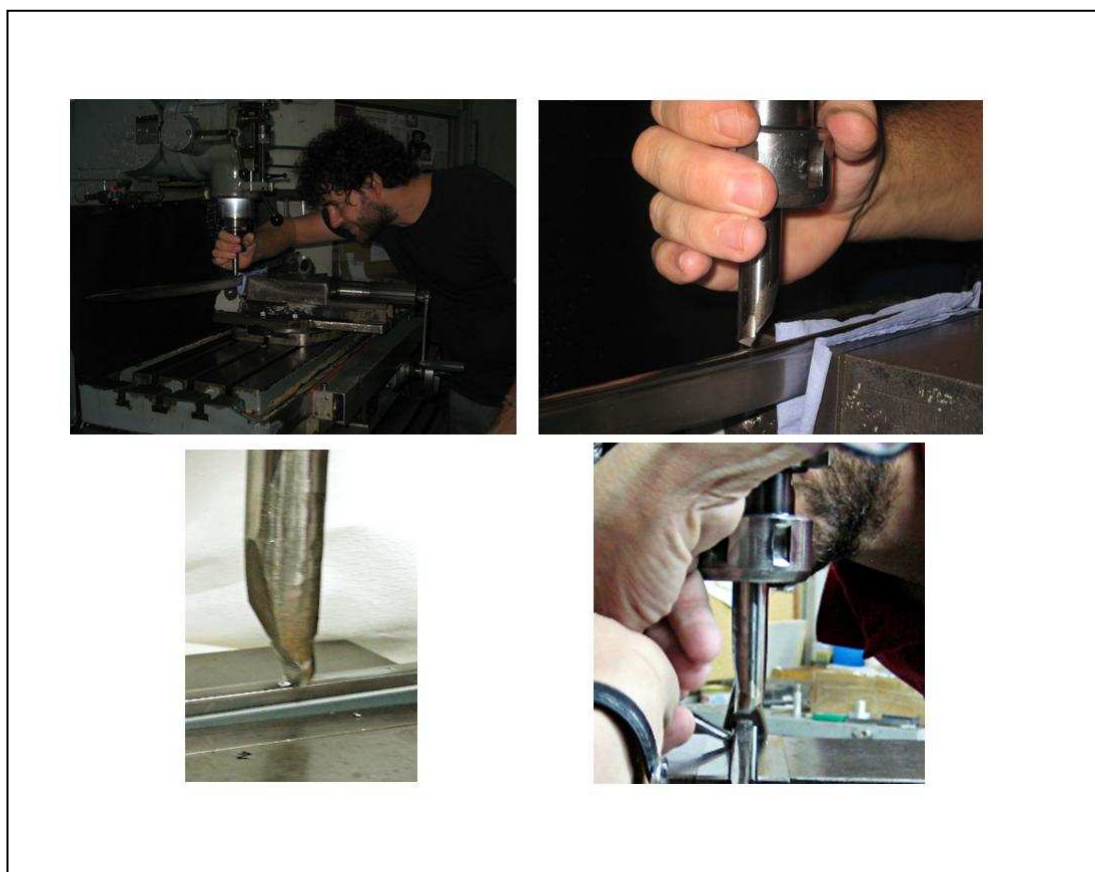


Figura.85: Proceso de extracción de muestras, mediante fresadora, en el Taller Mecánico de la Universidad Complutense de Madrid.

En los casos de muestras fabricadas, con la intención de conocer los datos precisos de los tratamientos termomecánicos y termoquímicos que íbamos a aplicar a nuestros modelos de puñales, se cortaron sin ninguna limitación, que no fuera el tamaño adecuado para su posterior preparación y observación metalográfica.

Los microscopios electrónicos de barrido empleados fueron: un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo JEOL JSM 6335F, equipado con cañón de electrones de cátodo frío de emisión de campo, un detector de electrones secundarios con amplificación (MAG) de 10X (a los 39 mm de WD) a 500000X, con resolución de imagen de 1,5 nm (a 15KV) y 5 nm (a 1 KV), y otro detector de electrones retrodispersados con resolución de imagen 2 nm (a 30 KV), y análisis EDS (elemental cualitativo por dispersión de energía), Oxford Instruments modelo X-Max de 80 mm² con una resolución de 127 eV a 5,9 KeV. Asimismo ha sido empleado un microscopio electrónico de barrido JEOL 6400, equipado con cátodo termoiónico de filamento de wolframio, un detector de electrones secundarios con resolución de imagen a 35KV, y otro detector de electrones retrodispersados con resolución de imagen 10 nm, y análisis EDS con resolución de 133 eV. Además, en la preparación de las muestras para microscopia de barrido se ha empleado metalización con oro o evaporación con grafito. Todos estos equipos del CAI de Microscopia Electrónica Luis Bru de la Universidad Complutense de Madrid.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la exposición de los resultados y discusión de la investigación realizada, creemos necesario introducir este apartado de los resultados obtenidos con el shamshir de Mehemet Alí, forjado por el maestro Assad Allâh al-Isfahânî, y otros del mismo taller de la colección privada del profesor D. Jaime Brihuela. A continuación, iremos exponiendo y discutiendo los resultados obtenidos según los apartados de *la propuesta tecnológica de la fabricación de armas con acero de Damasco según la investigación histórica y arqueométrica* realizada (apartado II., pág. 82).

IV. 1.- Obtención del acero base por fusión de hierro ARMCO y aleantes.

La materia prima de la investigación fue el hierro ARMCO, ferroaleaciones y hierro ARMCO, como ya ha sido descrito en la técnica experimental. Se obtuvieron dos productos bien definidos: acero de Damasco y acero suave. Este acero suave sirvió como materia prima para la obtención de acero de Damasco por carburización a alta temperatura.

IV. 1.a.- Acero de Damasco por fusión directa y colada.

La estructura de colada del acero de Damasco, diseñado para esta investigación, presenta una matriz de granos perlíticos en una malla o red de cementita primaria (proeutectoide) en límites de grano. Los cristales de cementita proeutectoide continua en límites de grano, son idiomórficos y de gran tamaño y envuelven, de forma continua y masiva, los granos perlíticos; presentando, además, estructuras aciculares tipo Widmanstätten, hacia el interior de éstos. La perlita es grosera, presentando un espaciado interlaminar muy homogéneo (Figuras. 85-90).

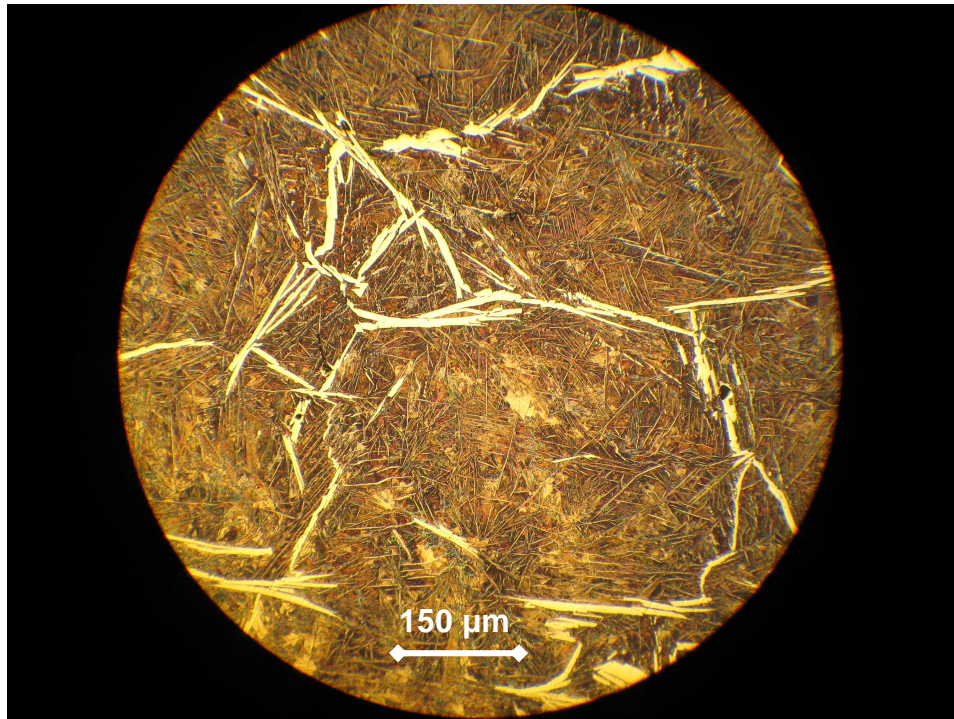


Figura.85: Macrografía de la estructura de colada del acero de Damasco. Los cristales idiomórficos de cementita primaria bordean de forma continua los límites de grano, formando una tupida red.

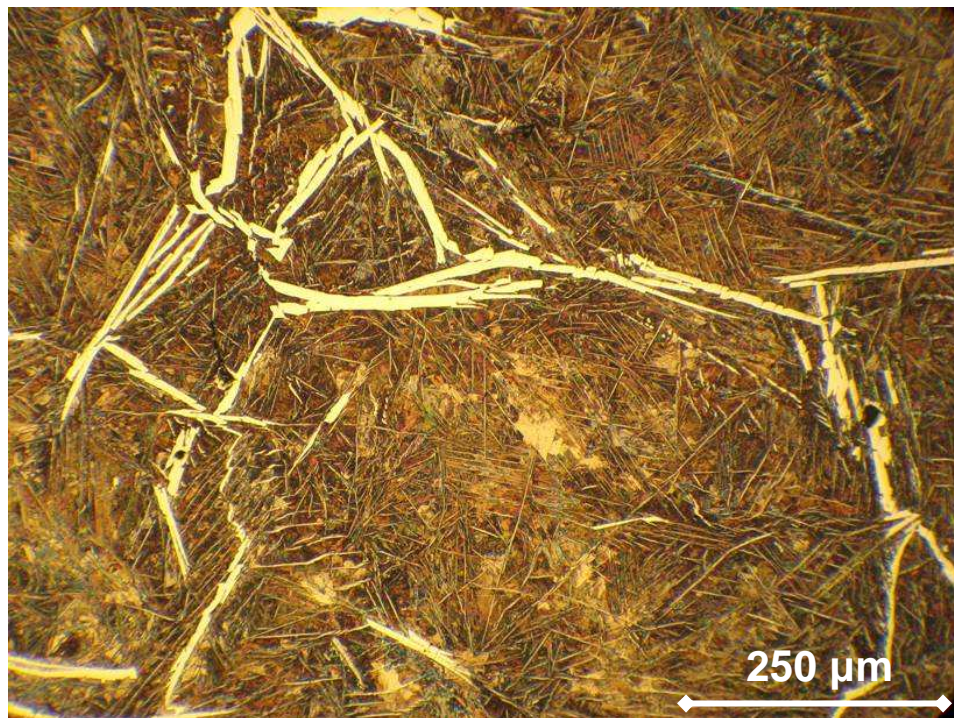


Figura.86: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura de la figura.85 mostrando, claramente, la estructura acicular tipo Widmanstätten de la cementita primaria del interior de los granos perlíticos.

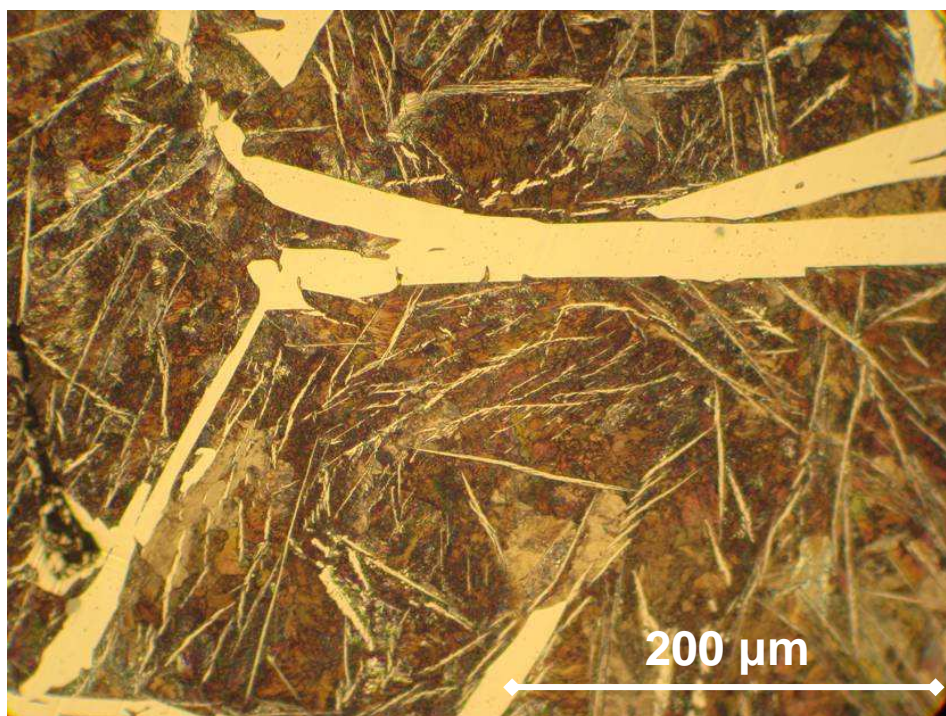


Figura.87: Detalle de la estructura de la figura.85 mostrando en tonos oscuros la matriz perlítica con presencia de cementita acicular tipo Widmanstätten y grandes cristales de cementita primaria en límite de grano.



Figura.88: Macrografía, obtenida mediante M.E.B., de la estructura de colada del acero de Damasco descrita en la figura.85.



Figura.89: Detalle, a mayores aumentos de la figura. 88, mostrando un gran cristal de cementita primaria, finas acículas de cementita primaria tipo Widmanstätten y la matriz perlítica.



Figura.90: Detalle, a mayores aumentos de la figura.88, mostrando la matriz perlítica y las acículas tipo Widmanstätten de cementita primaria.

IV. 1.b.- Acero suave por fusión directa y colada.

Al igual que con el acero de Damasco de fusión y colada; también se obtuvo acero suave (%C: (0'08-0'15)) a partir de hierro ARMCO y ferroaleaciones. La composición química es en todo semejante a los aceros suaves que se obtenían por reducción directa con carbón vegetal a partir de óxidos de hierro (magnetitas y hematitas).

Ajustada su composición en C, Si, Mn, S y P, se coló en crisol y en moldes con forma de pletina. La estructura metalográfica de este acero colado, es la típica, con ferrita acicular, formada a partir de los límites de grano de la austenita, y en las interfases de la ferrita aparecen finos carburos precipitados en ferrita. Las zonas oscuras, que se observan entre las acículas de ferrita, ocupan un gran porcentaje de la superficie; sin embargo, el contenido en carbono es muy bajo, el aspecto es debido a la distribución de los carburos precipitados (Figura. 91 y 92).

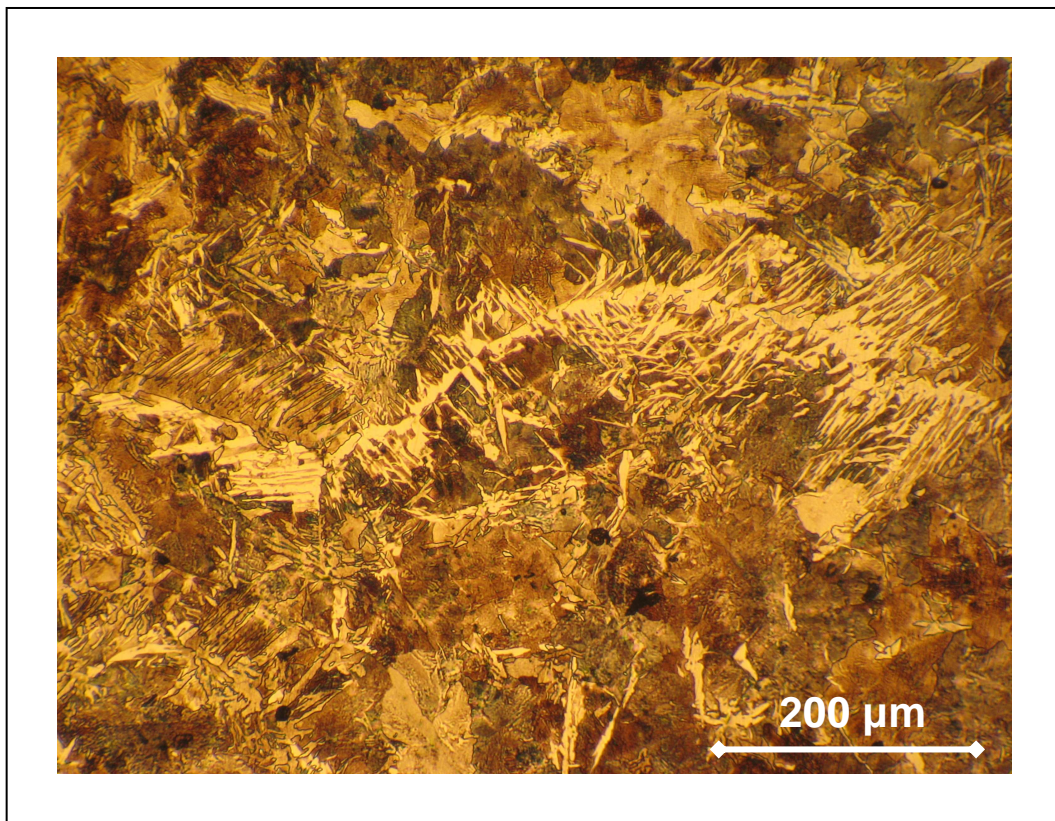


Figura.91: Estructura de colada del acero hipoeutectoide suave fabricado para seguir el procedimiento de carburización.

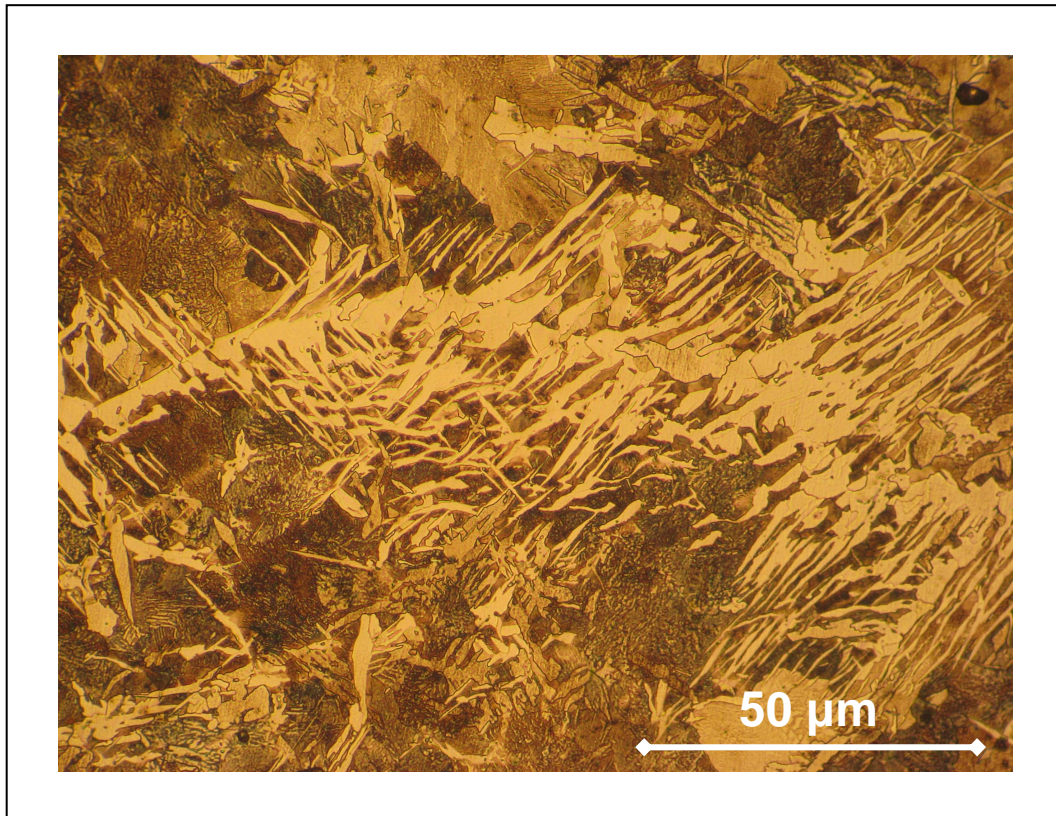


Figura.92: Detalle, a mayores aumentos de la estructura de la figura.91, en la que se observa ferrita acicular y una matriz de ferrita con carburos precipitados.

IV. 1.c.- Recocido a alta temperatura y enfriamiento lento del acero de Damasco.

Como ya se discutió en la introducción y siguiendo las indicaciones de Verhoeven, Pendray, Wadsworth, Sherby, Criado, Calabrés, etc. ^[38-49], la estructura obtenida por colada del acero de Damasco, anteriormente descrita, en el apartado IV.1.a., no es del todo apta para obtener las bellas aguas de los Damascos durante su forja en caliente. La presencia de granos de tipo mediano y la presencia masiva de cementita acicular Widmanstätten, restan volumen a la cementita primaria en límites de grano, causando durante la forja de la aparición de las bandas sinuosas de carburos de hierro.

Estos autores recomiendan que se haga un recocido de este acero de colada, a alta temperatura (1150°C), seguido de un enfriamiento lento. Nosotros, al igual que ellos, hemos podido comprobar cómo el grano austenítico crece a esa temperatura con el tiempo y que, durante el enfriamiento lento, toda la cementita Widmanstätten pasa a engrosar la cementita primaria en límites de grano. Así, aumenta la distancia entre los límites de grano y el volumen de éstos (Figura.93-100).

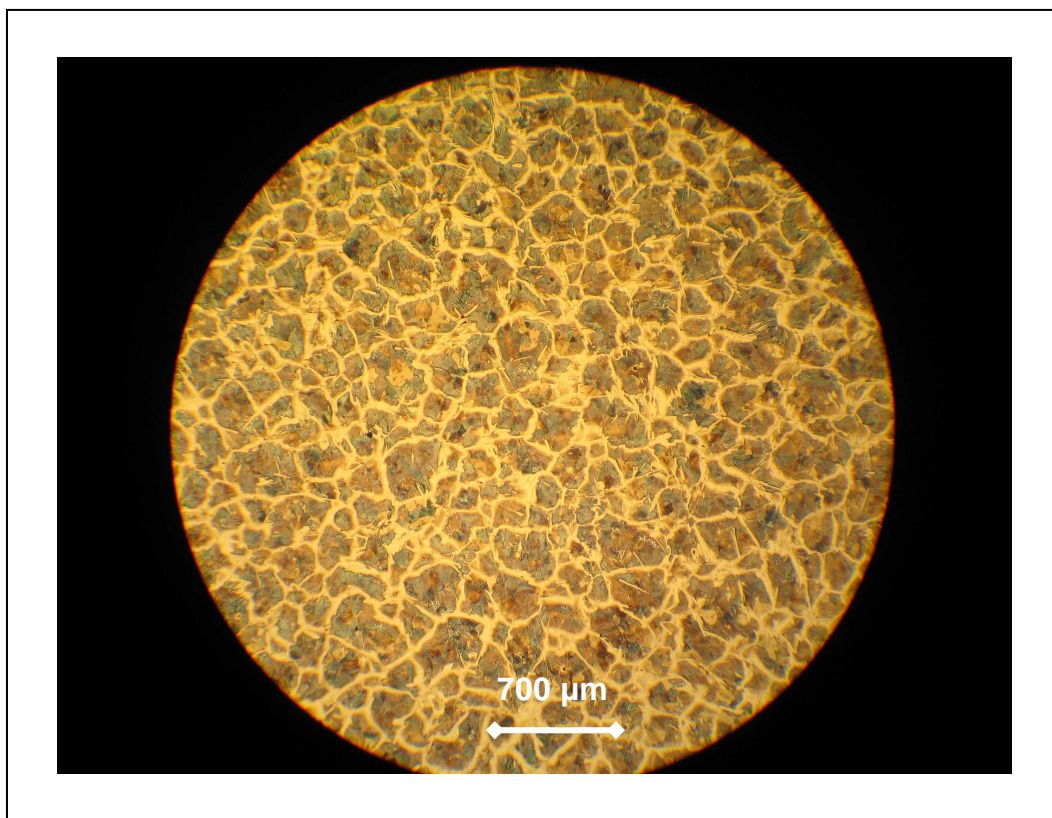


Figura.93: Macrografía del acero de Damasco de las figuras. 85 a 90, después de 3 horas de recocido a 1150°C y enfriamiento en el horno. Se observa una tupida red de cementita primaria en límites de grano y ausencia total de cementita primaria tipo Widmanstätten.

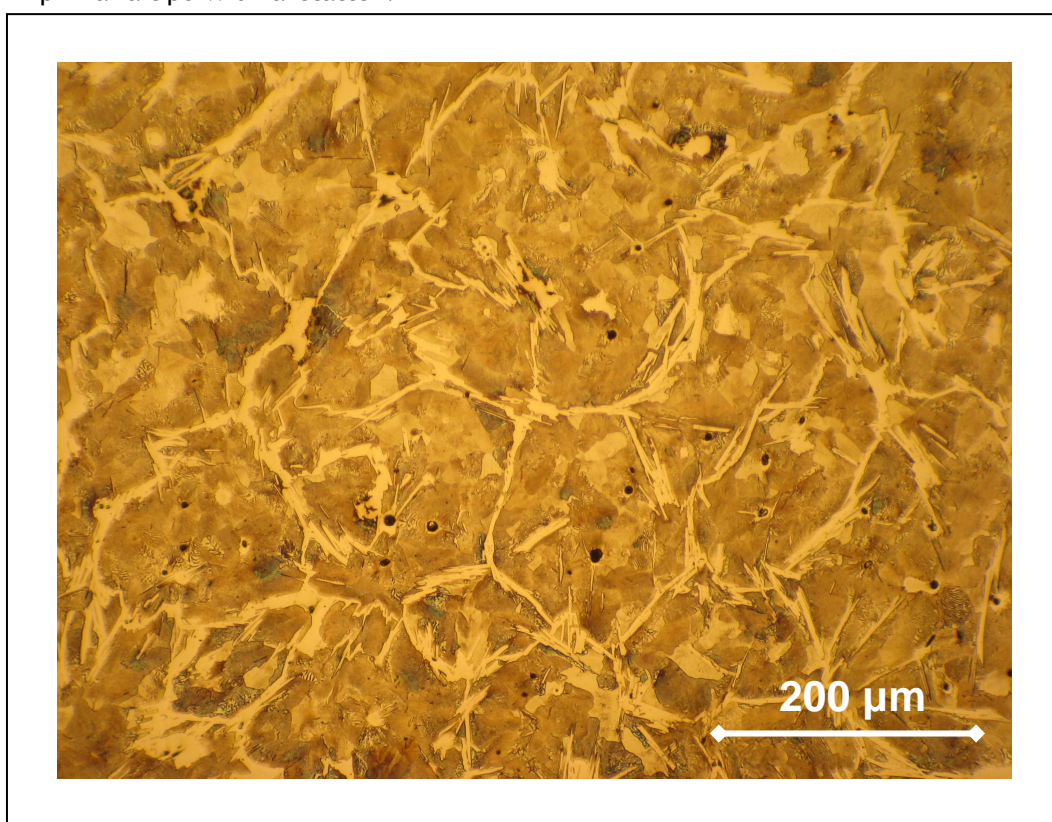


Figura.94: Micrografía de la figura. 93, en la que se observa ausencia total de cementita acicular tipo Widmanstätten en el interior de los granos perlíticos.

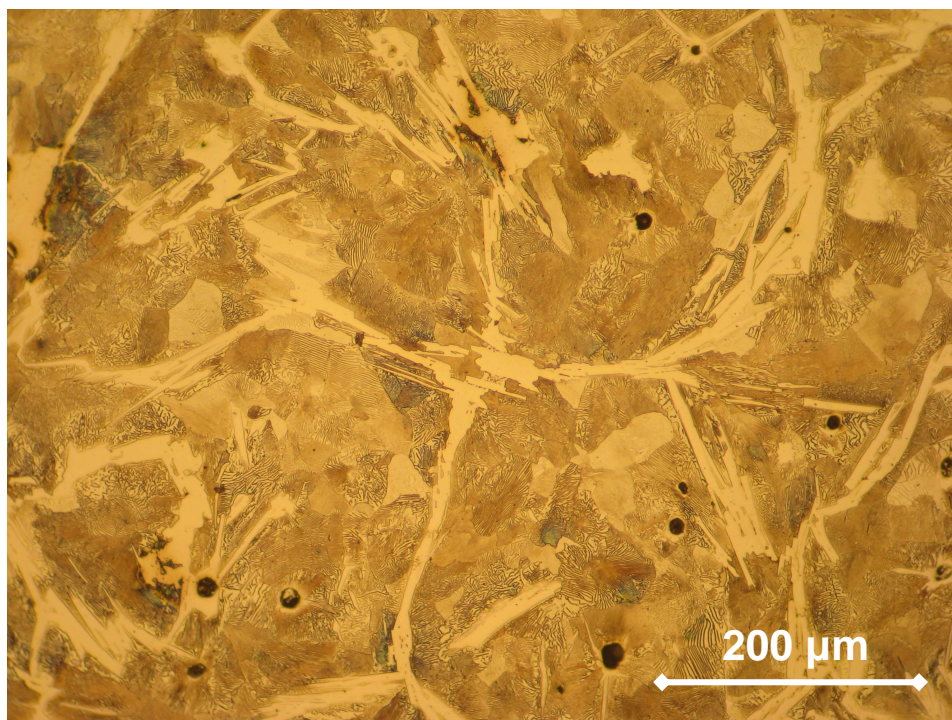


Figura.95: Detalle de la estructura de la figura. 93, en el que se observa la matriz perlítica exenta de acículas de cementita primaria.

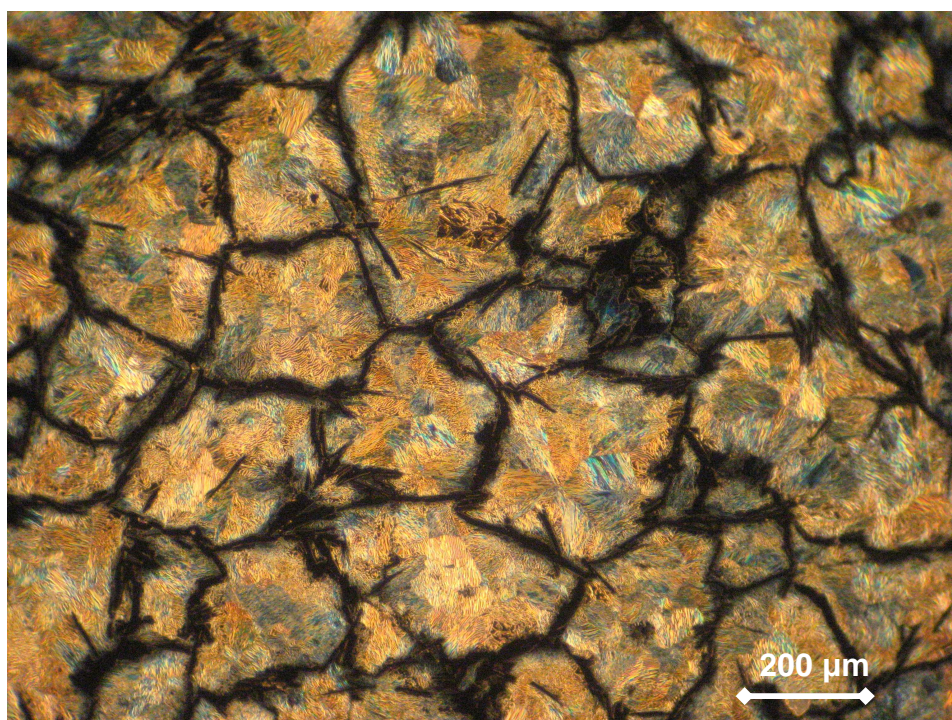


Figura.96: Micrografía del acero de las figuras 93 a 95, en campo oscuro, mostrando en color oscuro la red intergranular de cementita primaria y la ausencia total de cementita acicular tipo Widmanstätten..

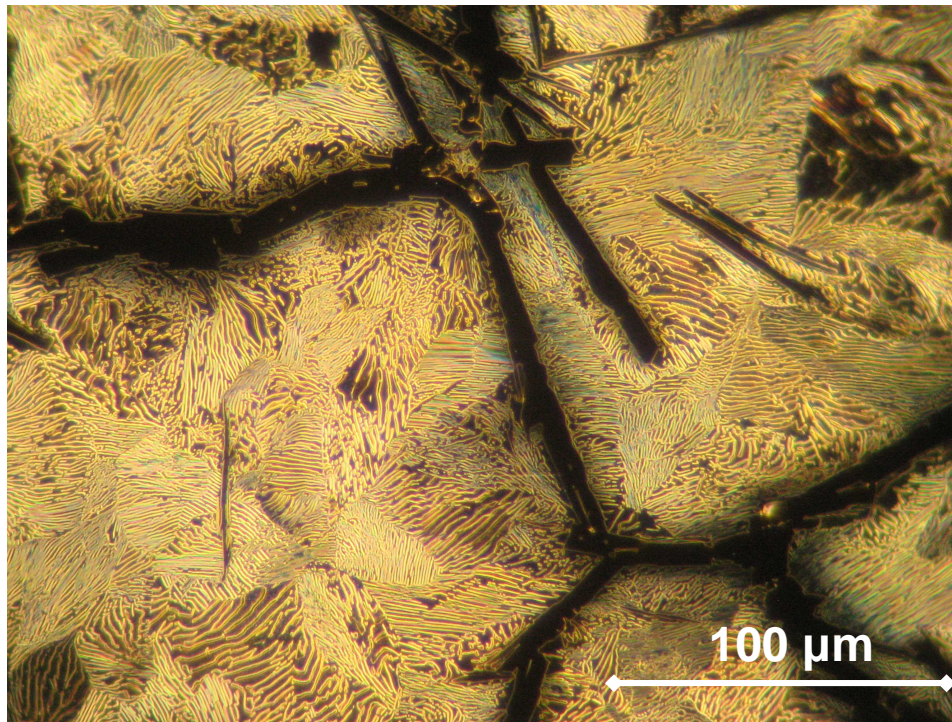


Figura.97: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura de la figura.96, mostrando la matriz perlítica y la ausencia de cementita acicular tipo Widmanstätten.

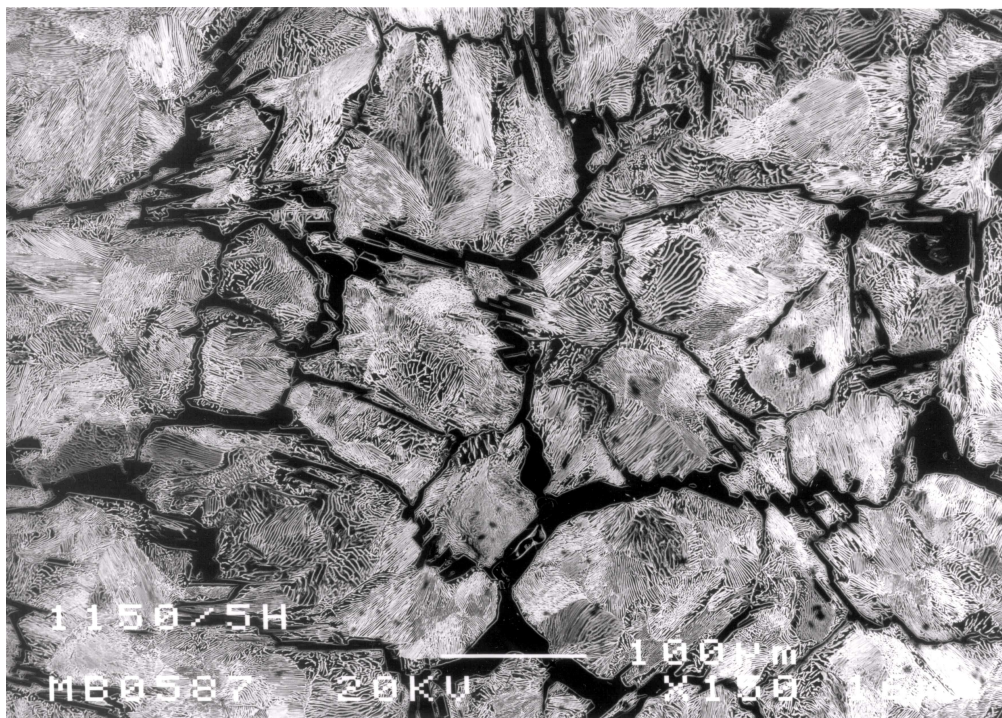


Figura.98: Micrografía obtenida mediante M.E.B. de la estructura comentada en las figuras 93 a 97. Se observa una matriz perlítica, la red de cementita primaria intergranular y ausencia de cementita acicular tipo Widmanstätten. Compárese esta estructura con las de colada en las figuras 88 a 90.

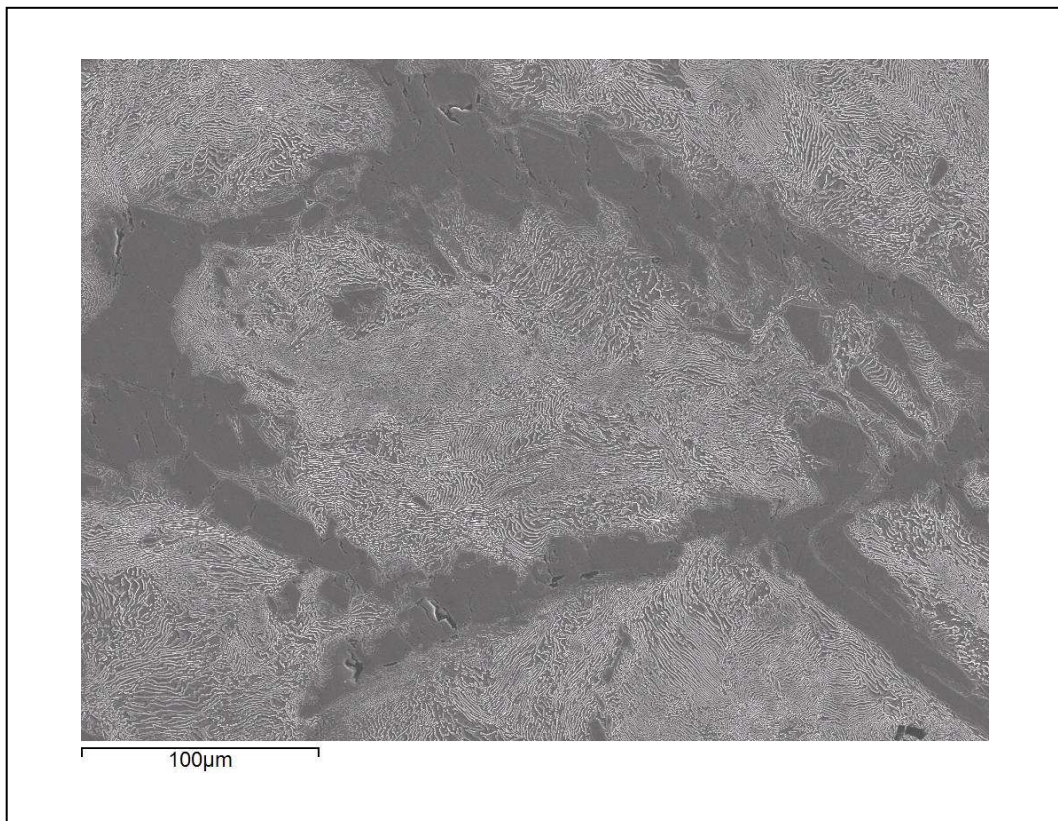


Figura.99: Micrografía obtenida mediante F.E.G. de la estructura de la figura 98. Obsérvese la ausencia de cementita acicular tipo Widmanstätten en la matriz perlítica.

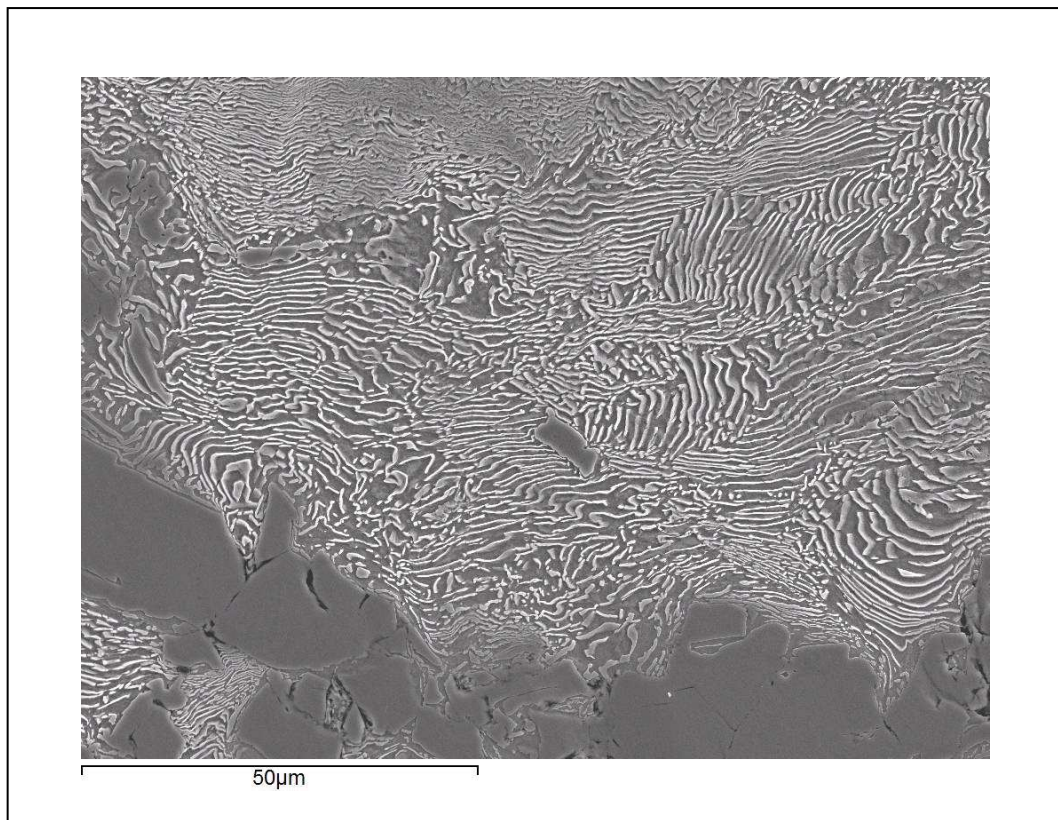


Figura.100: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura de la figura 99, mostrando ésta ausencia de cementita acicular.

IV. 2.- Tratamiento térmico de carburización a alta temperatura en crisol cerrado con carbón vegetal.

Para disponer de acero de ultraalto contenido en carbono en época antigua, medieval y moderna, la única forma de conseguirlo fue mediante la carburización de los hierros y aceros obtenidos por reducción de óxidos de hierro y con carbón vegetal. Los hierros y aceros antiguos se caracterizan por ser muy heterogéneos dependiendo de las pellas metálicas obtenidas por reducción. El batido de estas pellas o lupias, por forja en caliente, purificaba notablemente el hierro; pero rebajando aún más su contenido en carbono por decarburación. Por tanto, el material de partida era siempre un hierro o acero de bajísimo contenido en carbono, aunque de una aceptable pureza.

En muchas culturas se emplearon los procesos de carburización y cementación, pero solamente en la India y, en lo que fue y es el medio oriente musulmán, se llegó a carburizaciones tan intensas como para conseguir aceros al carbono con contenidos en este elemento, por encima del 1´4% al 1´6% en masa. Algo que, hoy en día clasificamos como aceros de herramientas. Y fueron precisamente estos pueblos los que desarrollaron desde la Antigüedad, pasando por la Edad Media y Moderna, lo que a finales del siglo XIX y primer tercio del XX, la forja de los aceros de herramientas hipercarburados. Es sorprendente que desde hace veinte siglos se conociera la preparación de aceros hipercarburados y su forja, que han sido descubiertos en occidente hace poco más de un siglo.

En nuestra investigación utilizamos un crisol cerámico, trozos del acero suave preparado, carbón vegetal y un cierre hermético con arena fina de río (Guadalquivir).

El calentamiento se efectuó por caldeo en el horno eléctrico (TAYLORMADE INDUCTION), a 1270°C-1370°C, durante 8 a 12 horas. Fue importante, en esta operación, que los trozos de carbón permitieran dejar algo de aire en el crisol, con el objeto de que se produjera CO, gas que provoca la carburización.

Las estructuras obtenidas por este procedimiento, ya descrito en la Propuesta Tecnológica, consisten en aceros de matriz perlítica y la cementita primaria con morfologías ledeburíticas en espacios interdendríticos. Hay que constatar el tamaño grosero de estos carburos ledeburíticos y la ausencia total de cementita primaria acicular, tipo Widmanstätten, distribuida por la matriz perlítica; como sí ocurría en el acero de Damasco de colada (Figuras. 101-107).

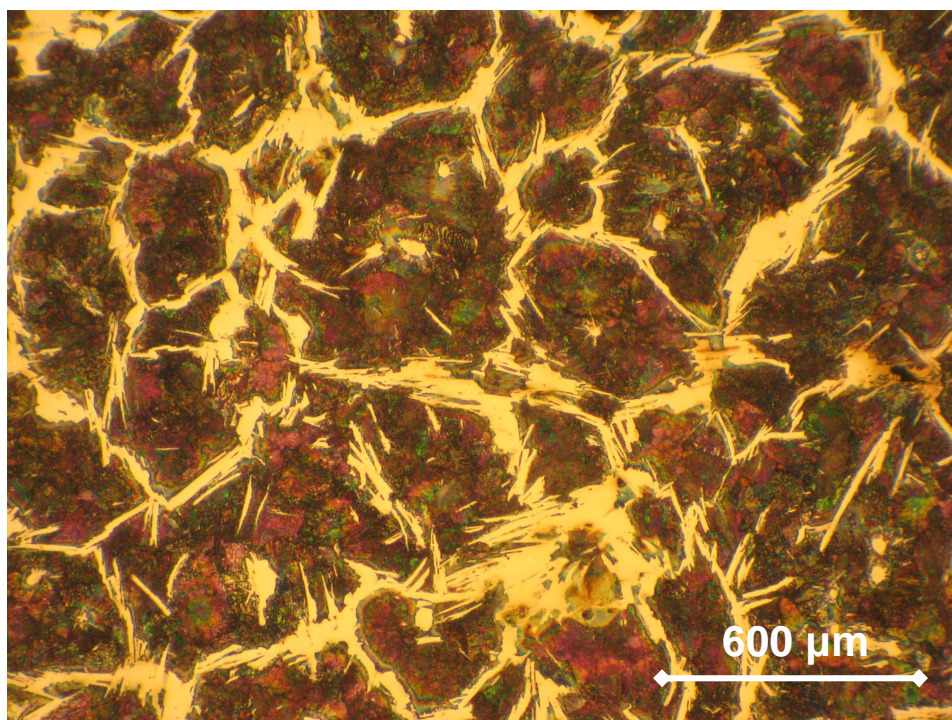


Figura.101: Estructura del acero de Damasco obtenido por carburización. Se observa una malla de cementita en espacios interdendríticos que coinciden con los límites de grano austeníticos. El grosor de esta cementita es significativo.

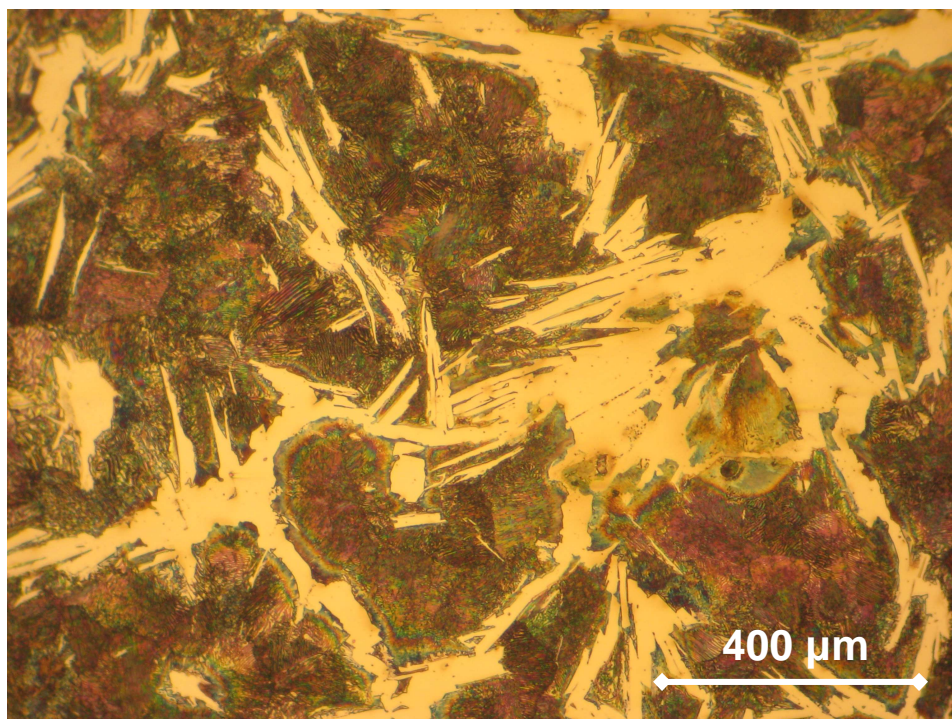


Figura.102: Detalle, a mayores aumentos de la figura.101, mostrando el grosor de la cementita primaria en límites de granos (espacios interdendríticos) y la ausencia de cementita acicular tipo Widmanstätten.

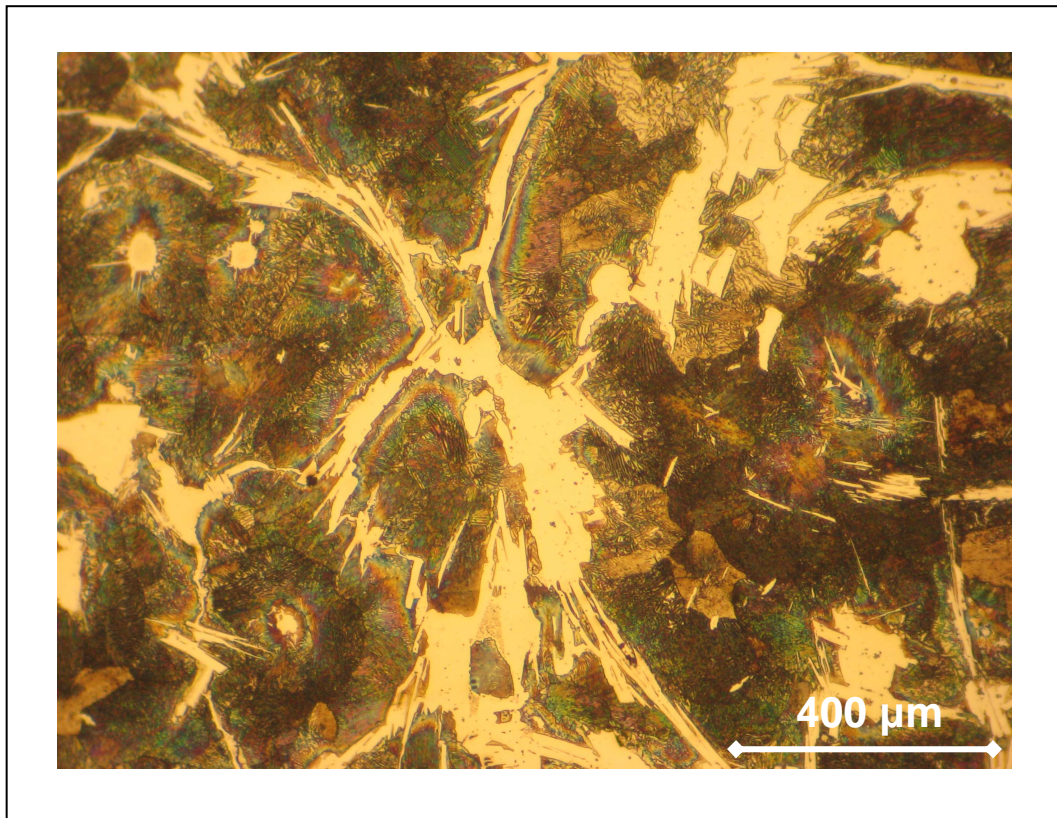


Figura.103: Micrografía de otra zona de la estructura de la figura.101, en la que se puede observar, claramente, el gran volumen de la cementita de origen ledeburítico.

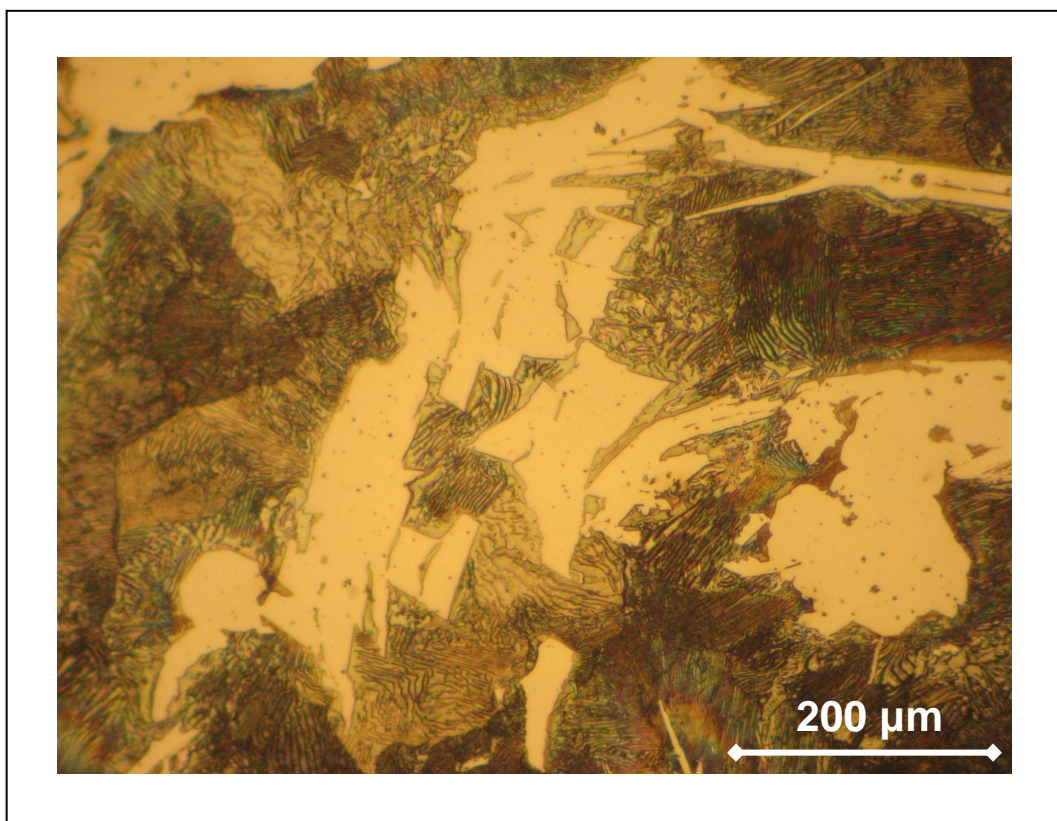


Figura.104: Detalle, a mayores aumentos de la figura.103, en el que se ven grandes cristales de cementita primaria en límites de grano y matriz perlítica.

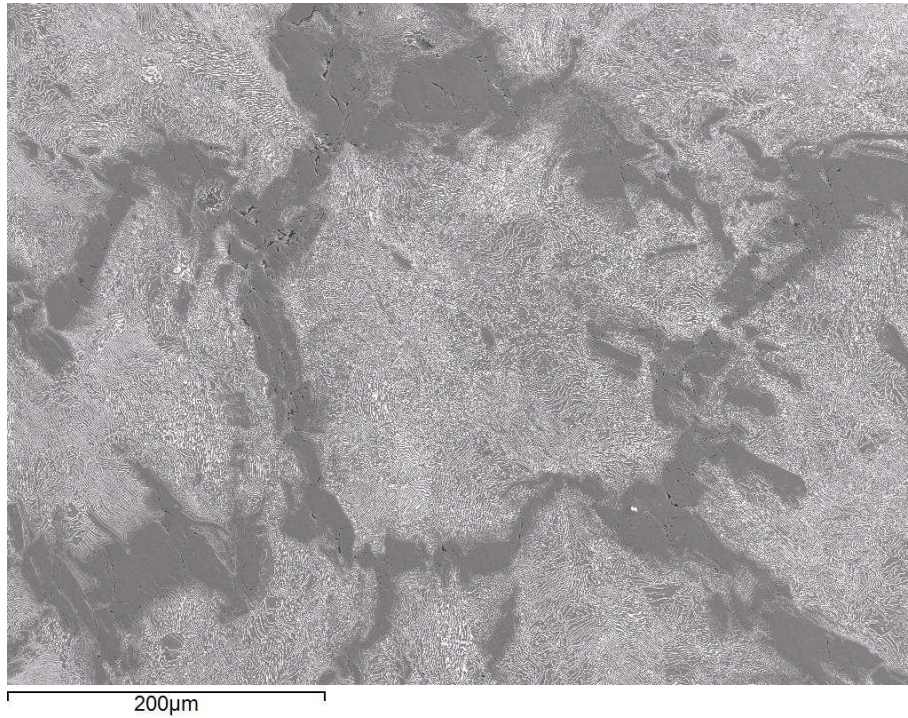


Figura.105: Micrografía obtenida mediante M.E.B., de la estructura del acero de la figura.101. El tamaño de los cristales de cementita proeutectoide en límite de grano es muy grosero.

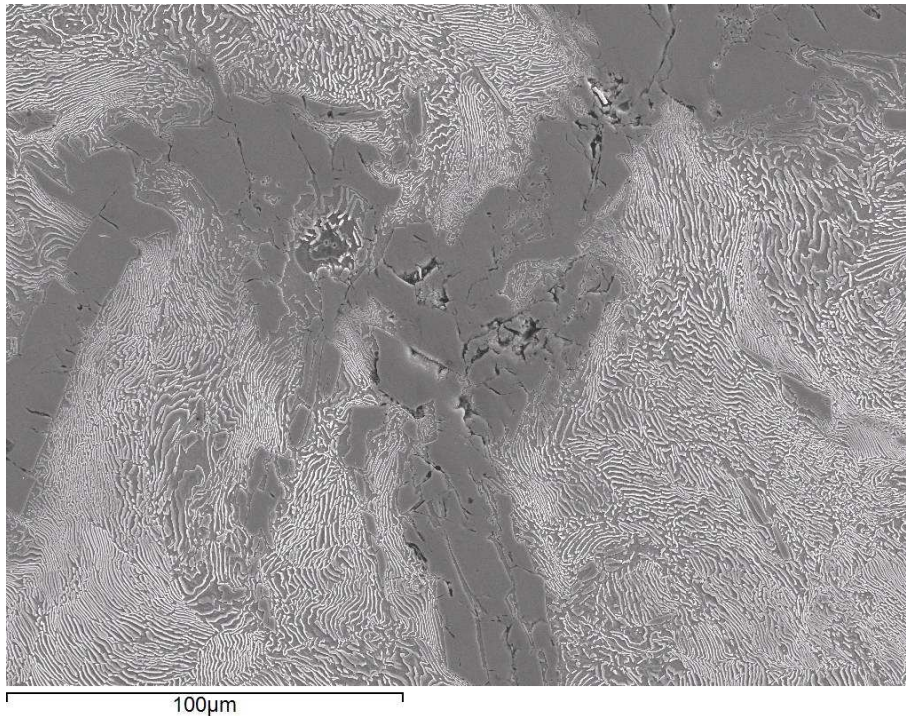


Figura.106: Detalle, a mayores aumentos de la figura.105, en el que se aprecia el gran volumen de los cristales de cementita proeutectoide en límites de grano y la ausencia total de cementita acicular tipo Widmanstätten en la matriz perlítica.

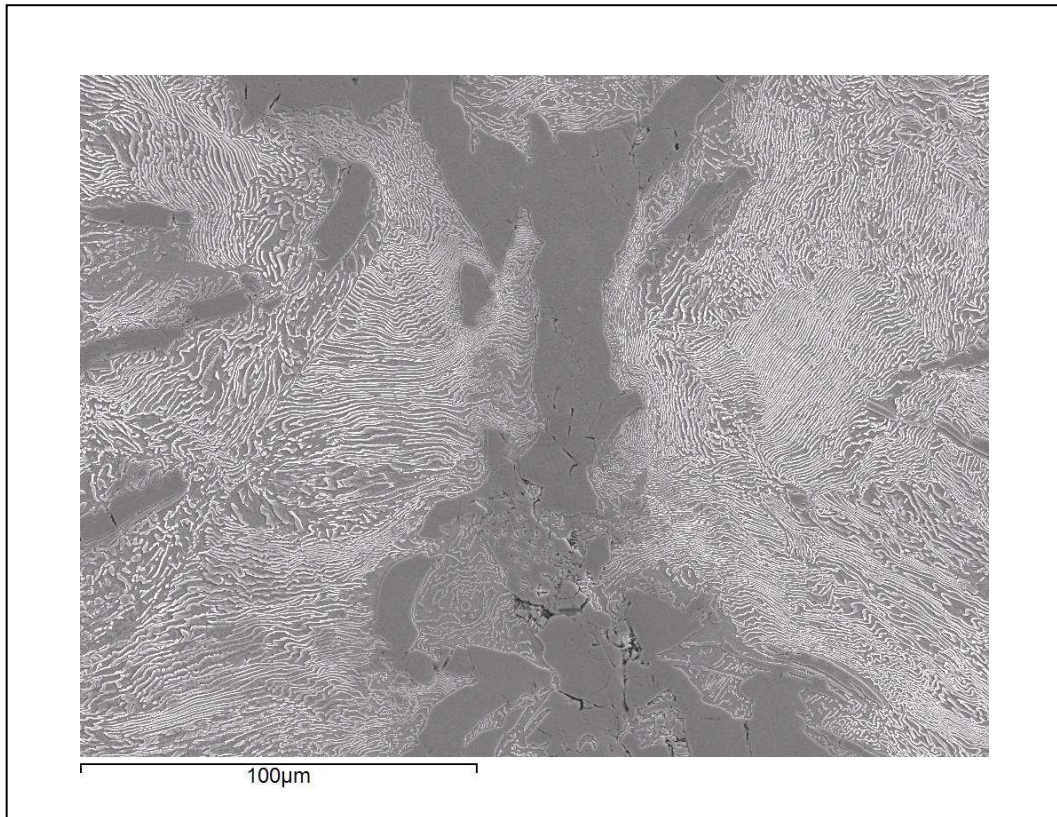


Figura.107: Otro detalle, a mayores aumentos de la figura.105, en el que se observa el gran volumen de los cristales de cementita primaria.

V. 3.- Tratamiento de endulzamiento del acero por decarburación o globulización parcial de la cementita primaria.

Este es otro tratamiento térmico previo a la forja de los aceros hipercarburados de herramientas. Se trata de ambos casos, tanto decarburación como globulización, de un recocido subcrítico por encima de la temperatura eutéctica y dentro del campo de estabilidad de la cementita primaria. De esta forma se produce un proceso de globulización de esta cementita. Si el acero de Damasco, se aislaba con arcilla refractaria, se podía ir a tiempos prolongados de dos o tres días, a temperaturas de 760°C a 780°C y, provocar una globulización intensa de la cementita primaria. Si no se protegía el acero con arcilla refractaria, la temperatura era la misma, pero el tiempo de calentamiento no superaba las dos o tres horas; tiempo en el que se producía una decarburación superficial.

Con la decarburación se provocaba, una superficie decarburada de 0'5 a 1 milímetros de profundidad, en la que la estructura resultante era un acero eutectoide o hipereutectoide. Esta capa hacía de escudo para la emergencia a superficie de la cementita proeutectoide en límites de grano. De esta manera, se podía comenzar la forja sin provocar agrietamiento y fractura frágil muy catastrófica. Naturalmente, al final de la forja del arma o la pieza de acero de Damasco, debía eliminarse una fina capa superficial, en piedra de agua, para llegar al corazón del acero de Damasco (Figuras. 108-112).

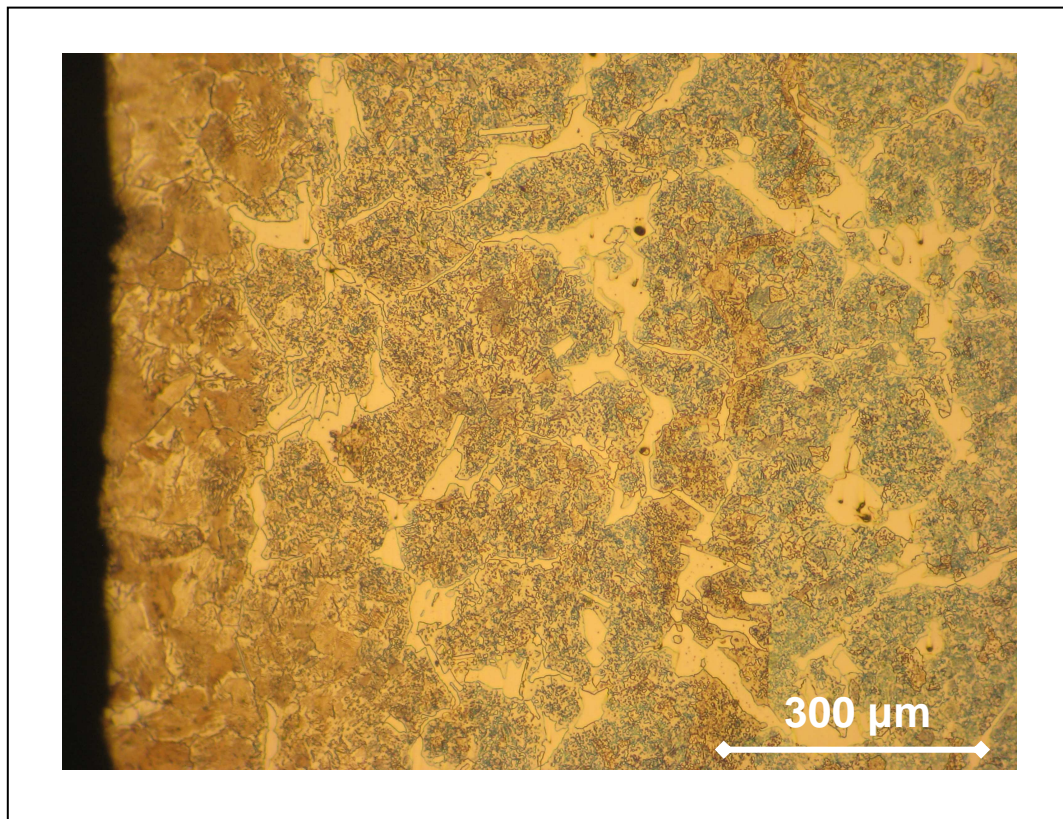


Figura.108: En esta micrografía se observa la capa decarburada a la izquierda, que se reduce su composición a la del eutectoide. El tratamiento de decarburación fue por calentamiento a 800°C durante 2 horas y enfriamiento en el horno.

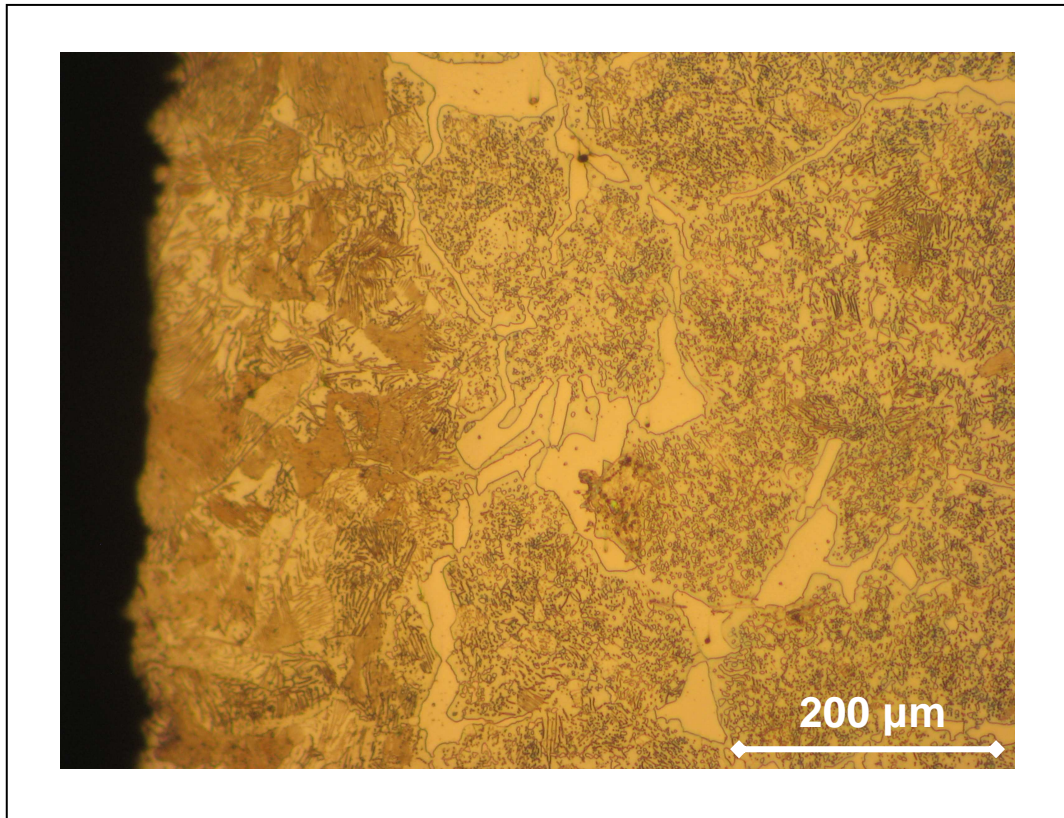


Figura.109: Detalle, a mayores aumentos, de la micrografía de la figura.108, en el que se observa la banda izquierda (superficie de la muestra), perlítica y, a la derecha, el acero hipereutectoide de Damasco con la cementita perlítica globulizada y la proeutectoide ledeburítica.

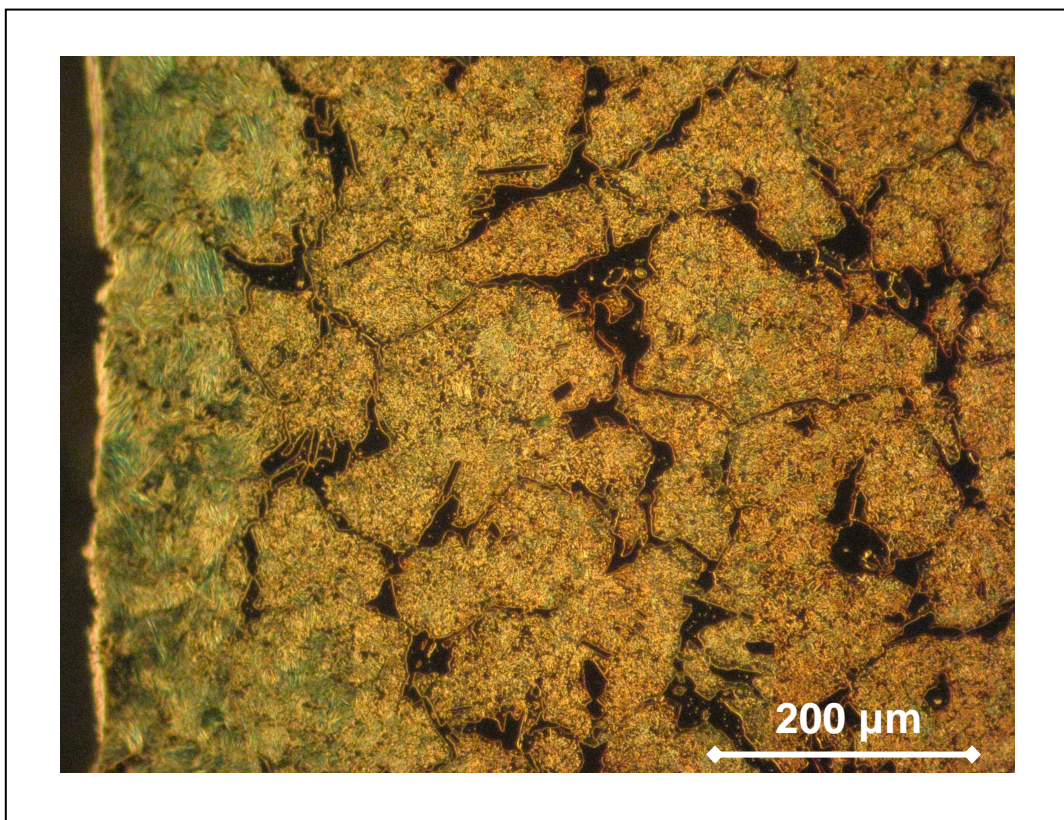


Figura.110: Se trata de la microestructura de la figura.108, pero obtenida en campo oscuro. Se ve, perfectamente, cómo la cementita ledeburítica no puede emerger a la superficie de la pieza por efecto de la decarburación.

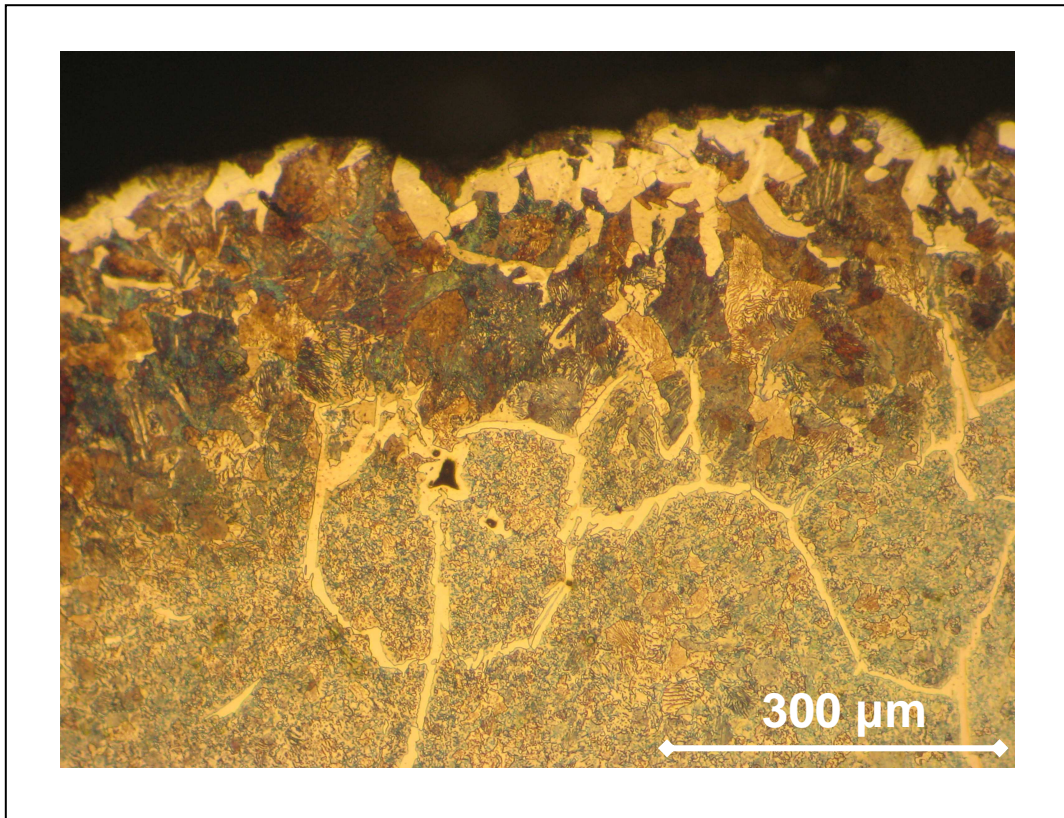


Figura.111: Estructura de la superficie de una pieza de acero de Damasco decarburado a 800°C durante 3 horas. Obsérvese cómo el acero de superficie es claramente hipoeutectoide.

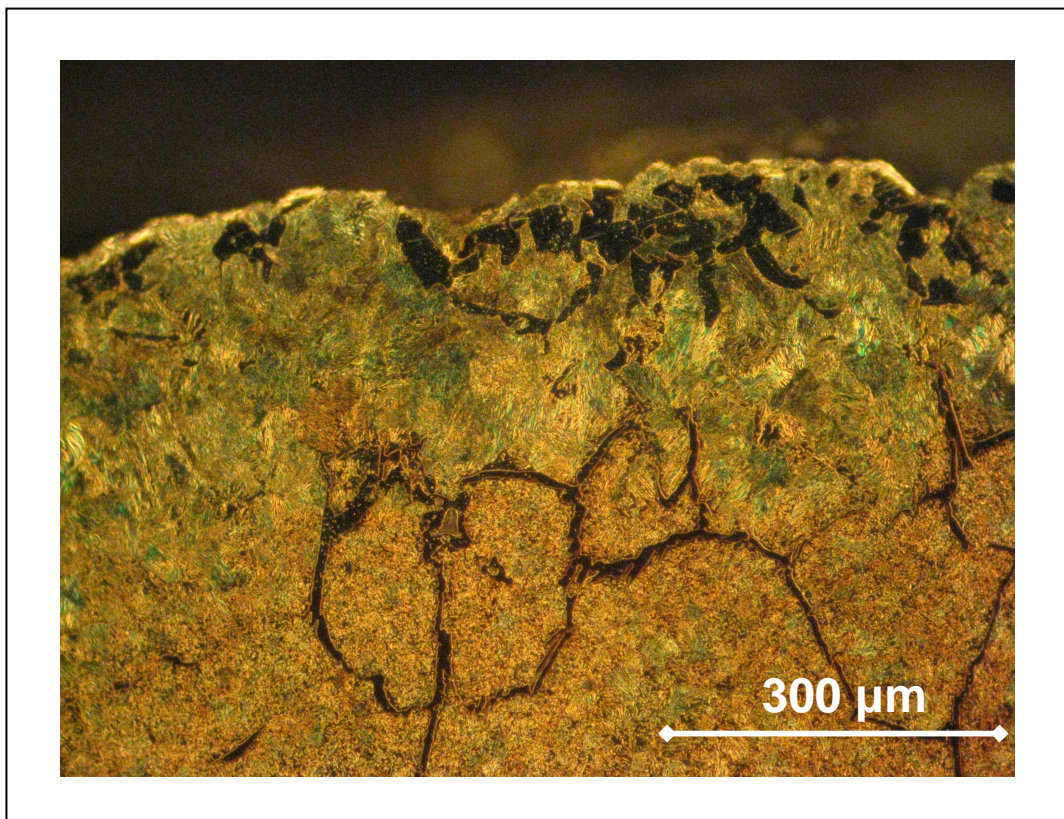


Figura.112: Se trata de la misma estructura de la figura.111, pero obtenida en campo oscuro.

El otro tratamiento térmico de endulzamiento previo a la forja y descrito en las crónicas musulmanas medievales y, también por cronistas occidentales en época moderna, es el de globulización. Este tratamiento térmico se adelanta, en muchos siglos, a la metalurgia contemporánea para a forja de aceros de herramientas. Para llevarlo a cabo, se necesitan temperaturas subcríticas y tiempos de tratamiento largos. Para evitar la carburación, las pieza tratadas deben revestirse con una envoltura de arena refractaria, tal y como dicen las crónicas consultadas. La temperatura de recocido subcrítico de globulización entre 760°C y 780°C, durante tiempos que oscilan entre las 48 y 72 horas, seguido de un enfriamiento lento en el horno.

Las estructuras resultantes, siempre que el enfriamiento sea lento en el horno, tienden al escalonamiento, más o menos intenso, y parcial globulización de la cementita primaria ledeburítica o en límites de grano; así como la globulización total de la cementita perlítica (Figuras. 113-118).

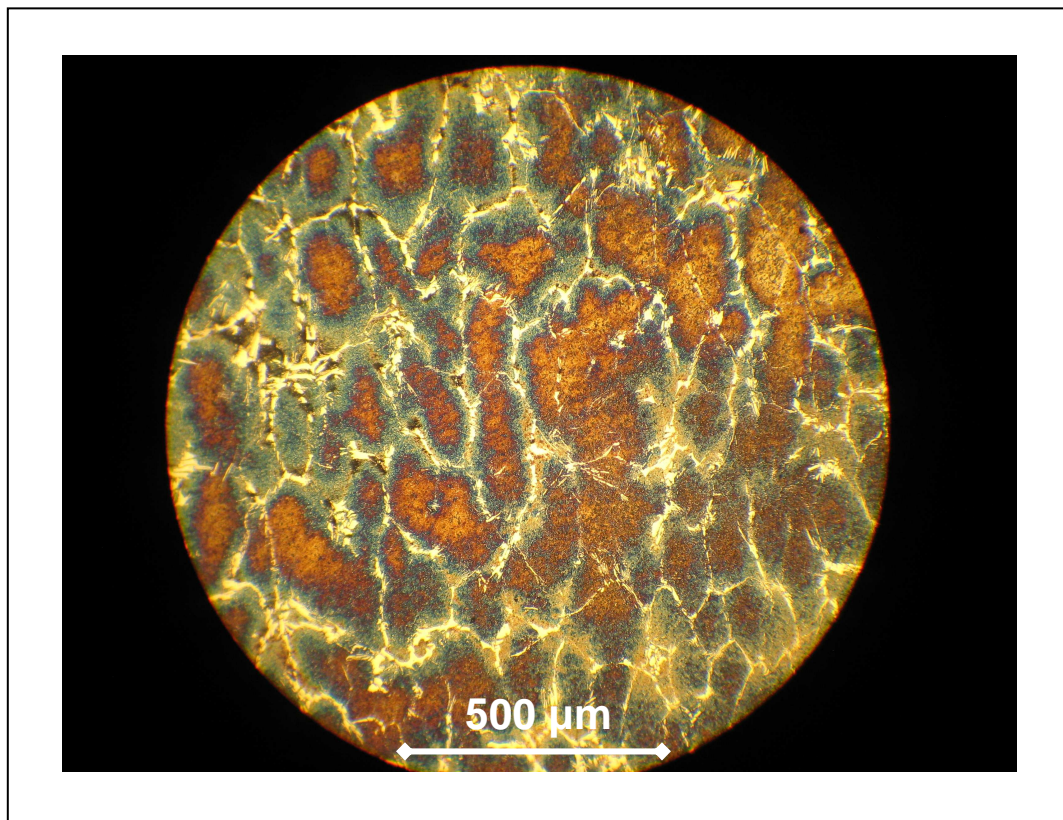


Figura.113: Macrografía de una zona de una pieza de acero de Damasco, con un tratamiento de recocido subcrítico de ablandamiento, de dos días a 760°C y enfriamiento lento en el horno. Se observa, claramente, la malla de cementita ledeburítica.

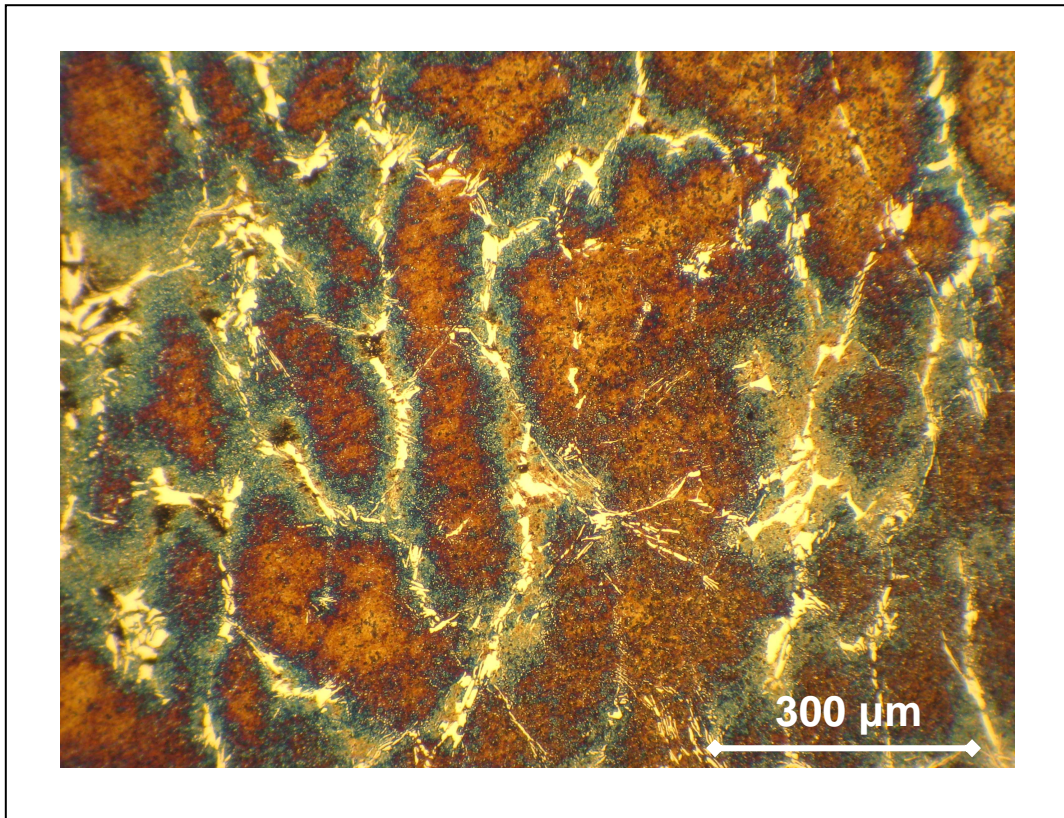


Figura.114: Detalle de la estructura de la figura.113, en el que se observa la cementita primaria ledeburítica en espacios interdendríticos, en una malla algo discontinua por efecto del tratamiento térmico de recocido subcrítico.

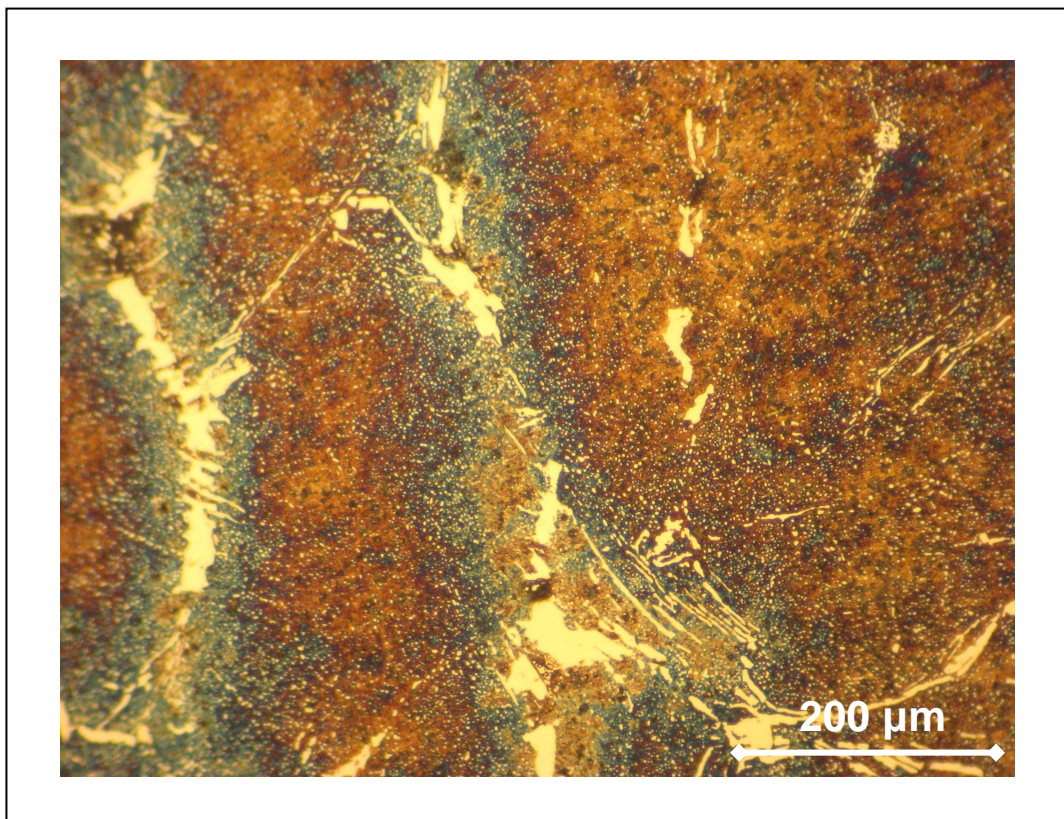


Figura.115: Detalle de la estructura de la figura.114, en el que se puede observar la parcial discontinuidad de la cementita ledeburítica.

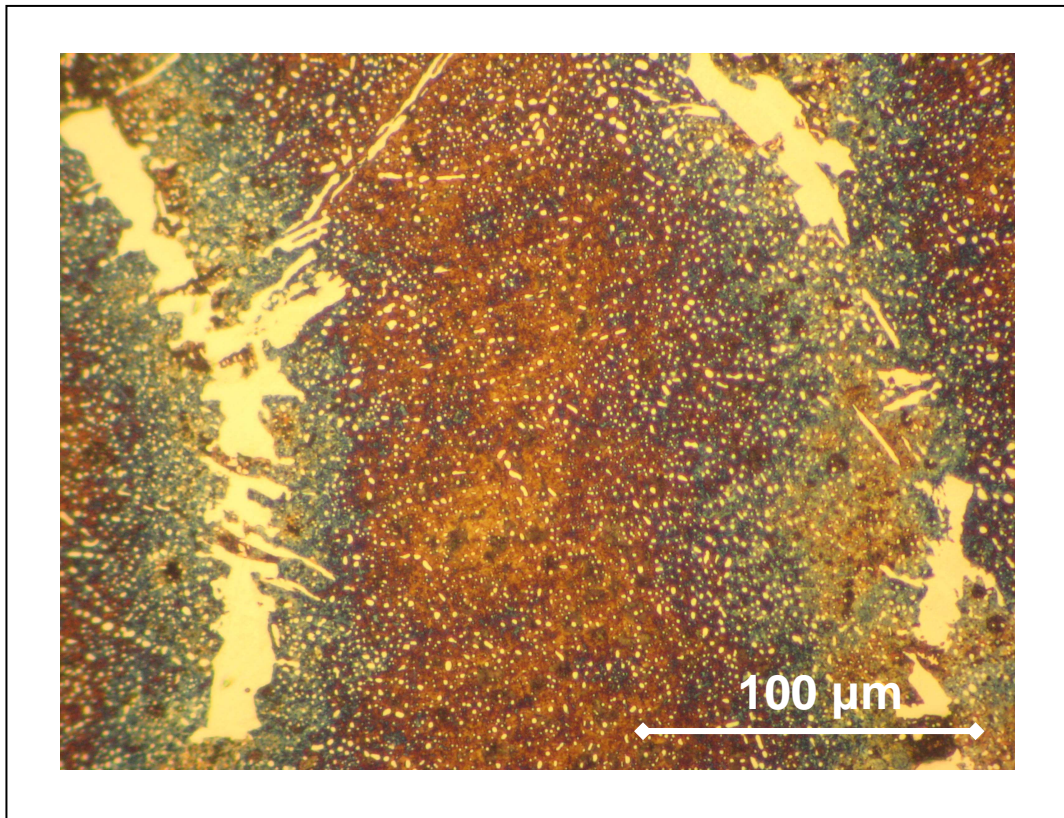


Figura.116: Detalle de la estructura de la figura.115, en el que se observa la discontinuidad de la cementita ledeburítica y la globulización total de la cementita eutectoide.

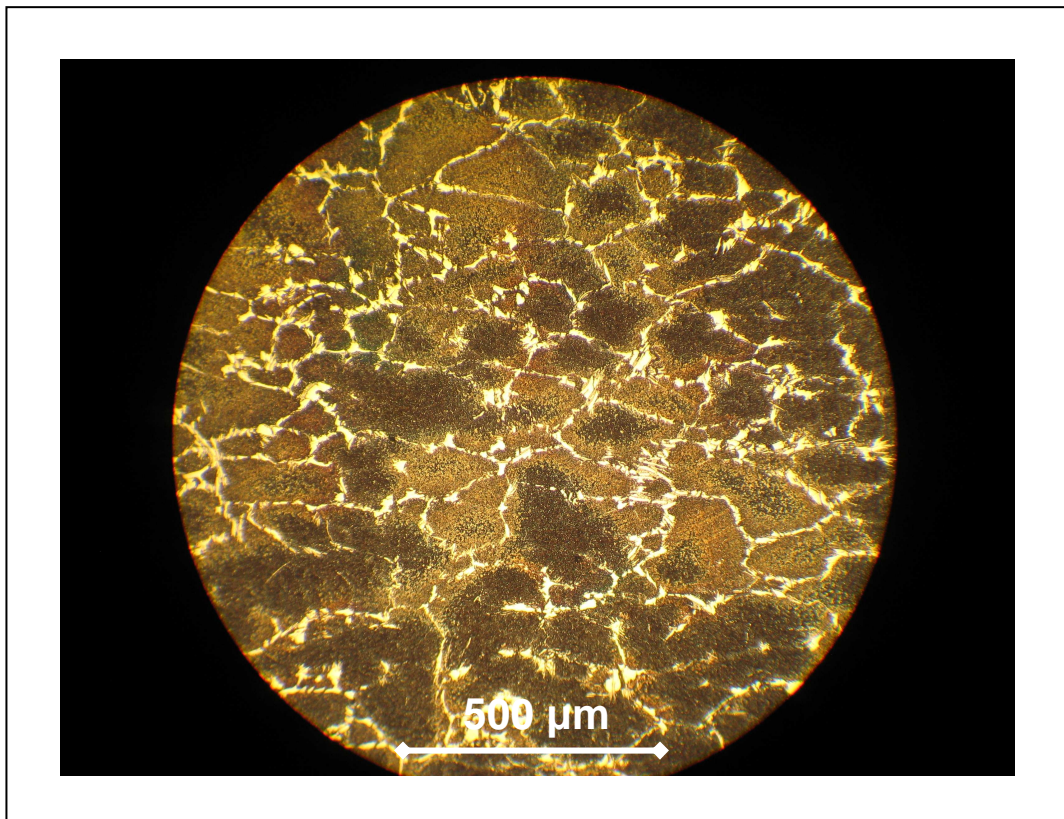


Figura.117: Macrografía de una zona de una pieza de acero de Damasco, con un tratamiento de recocido subcrítico de ablandamiento de tres días a 760°C y enfriamiento lento en el horno. Se observa, claramente, la malla de cementita ledeburítica subdividida pr efecto del tratamiento.

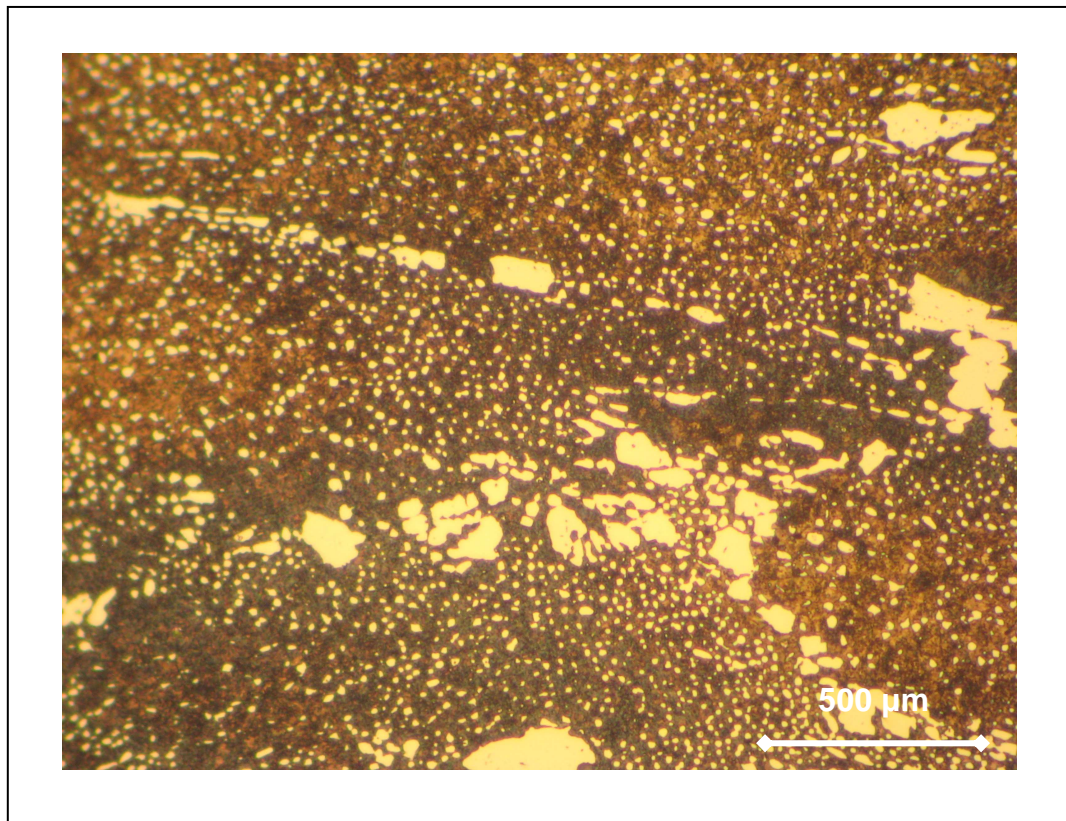


Figura.118: Detalle de la estructura de la figura.117, en la que se observa un escalonamiento muy efectivo de la cementita ledeburítica y, una globulización muy avanzada de la cementita de ambas procedencias: ledeburítica y eutectoide.

IV. 4.- Forja en caliente a la temperatura adecuada.

Endulzado el acero por decarburación o por recocido subcrítico de ablandamiento, se procede a la forja en caliente del acero para darle la forma deseada: puñales, espadas, azagayas, puntas de flechas y lanza, placas protectoras, espejos, instrumentos quirúrgicos, compases, etc.

La temperatura de forja ideal del acero de Damasco debe mantenerse en el intervalo de entre 650°C y 750°C. Nunca debe sobrepasarse la temperatura superior, que empezaría a ser muy crítica por encima de los 800°C. Esto traería la regeneración de una gran parte de la cementita continua en límite de grano y la fragilización total del acero. Se trata, pues, de intervalos de forja de corto tiempo; necesitándose numerosos intervalos de calentamiento en la fragua y forja. Cualquier descontrol en la temperatura límite superior, arruinaría todo el tedioso trabajo efectuado hasta ese momento amén del tratamiento térmico de endulzamiento y el termoquímico de carburización. La pieza rota quedaría inservible.

La estructura obtenida, por forja en caliente (650-750)°C, consiste en bandas o hileras de grandes cristales de cementita primaria, troceados y globulizados de manera importante y, entre ellas, cementita proeutectoide globulizada intensamente, en una matriz ferrítica de grano muy fino.

Las estructuras obtenidas van parcialmente cambiando, según las siguientes etapas: macho pilón y/o laminación y forja manual final con martillo. Si la estructura de partida es de cementita ledeburítica, de tamaño grosero y separación suficiente, el resultado final serán bandas de cristales groseros de cementita ledeburítica, perceptibles a simple vista y, con una separación suficiente como para superar nuestra agudeza visual. Por tanto, aparecerían las bandas claras y oscuras, visibles a simple vista, más finas o groseras; dependiendo del tamaño de los microconstituyentes de la estructura de partida. (Figuras.119-134).

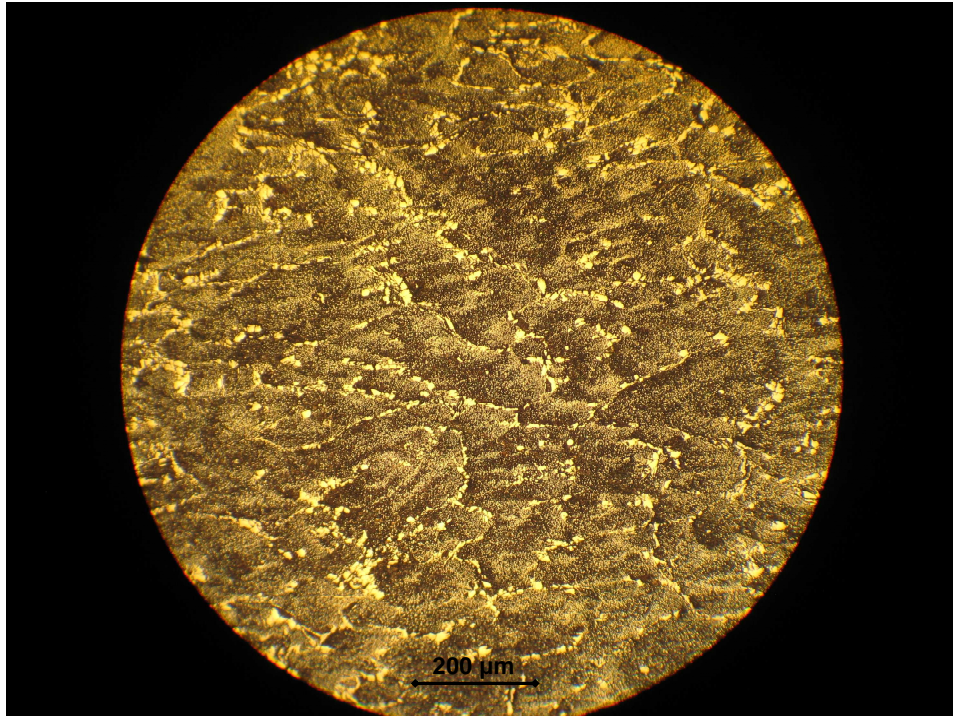


Figura.119: Macrografía de una zona de la estructura de una pieza de acero de Damasco, recocido subcrítico de ablandamiento, deformada por forja en martillo pilón o laminadora. Estructura intermedia antes de pasar a la forja manual. La estructura es equivalente a una laminación previa a la forja manual.

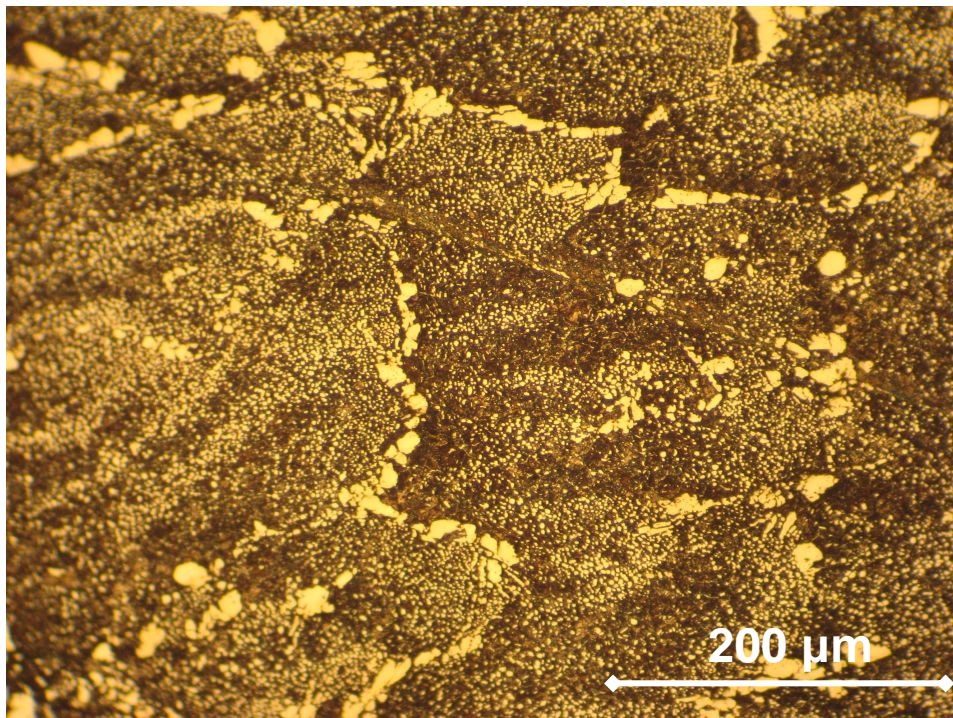


Figura.120: Detalle de la estructura de la figura.119, en el que se observa aplastamiento de la malla de cementita proeutectoide troceada, y cristales globulizados de cementita autectoide.

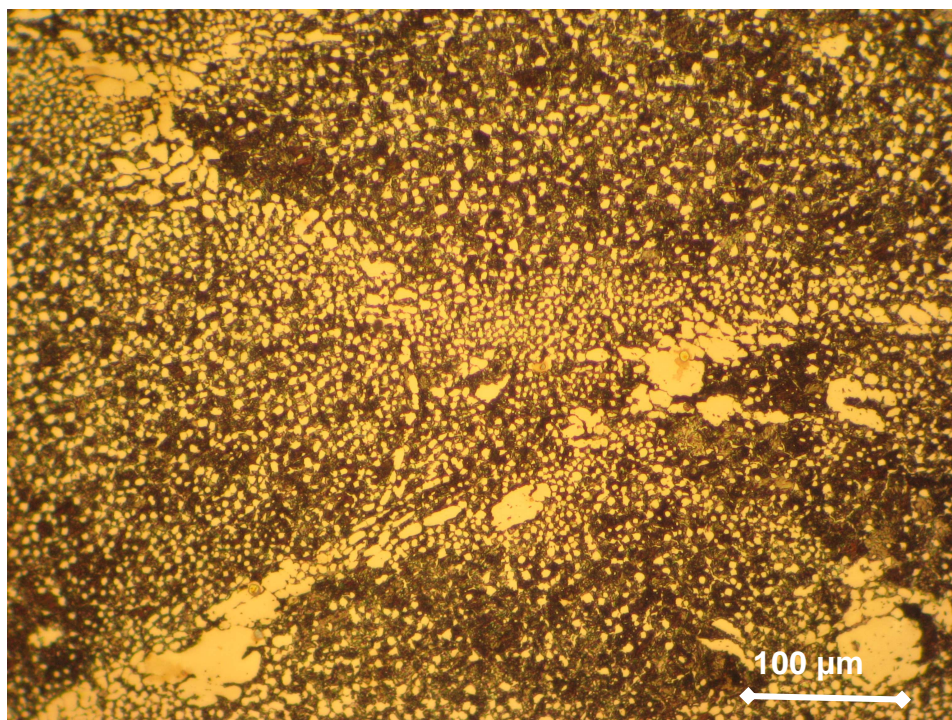


Figura.121: Detalle de la estructura de la figura.120, en el que se observan los trozos de cementita proeutectoide en fase de globulización y cristales de cementita proeutectoide totalmente globulizados.



Figura.122: Puñal de acero de Damasco, fabricado en el laboratorio por nosotros, mediante laminación. La forma y el filo se hicieron en la muela y el acicalado final por desbaste y pulido. El ataque químico se efectuó con Nital al 4%.



Figura.123: Detalle, a mayores aumentos, de la figura.122. En él se observa, claramente, el dibujo en malla o red que Anosov ^[19,20] clasifica como del tipo d).

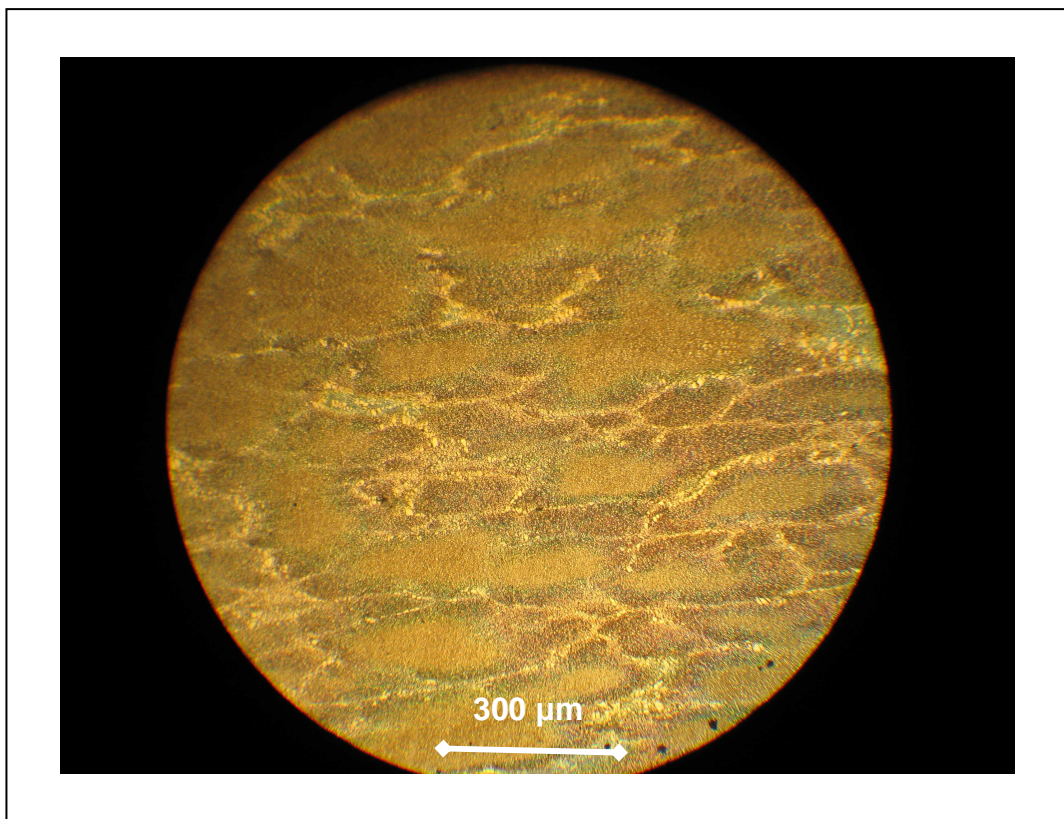


Figura.124: Estructura de un puñal acabado por forja en laminadora manual. Se ve aún la malla de cementita ledeburítica muy desdibujada y difuminada, alargada en bandas en la dirección axial al aplastamiento y lineal a la dirección de deformación plástica.

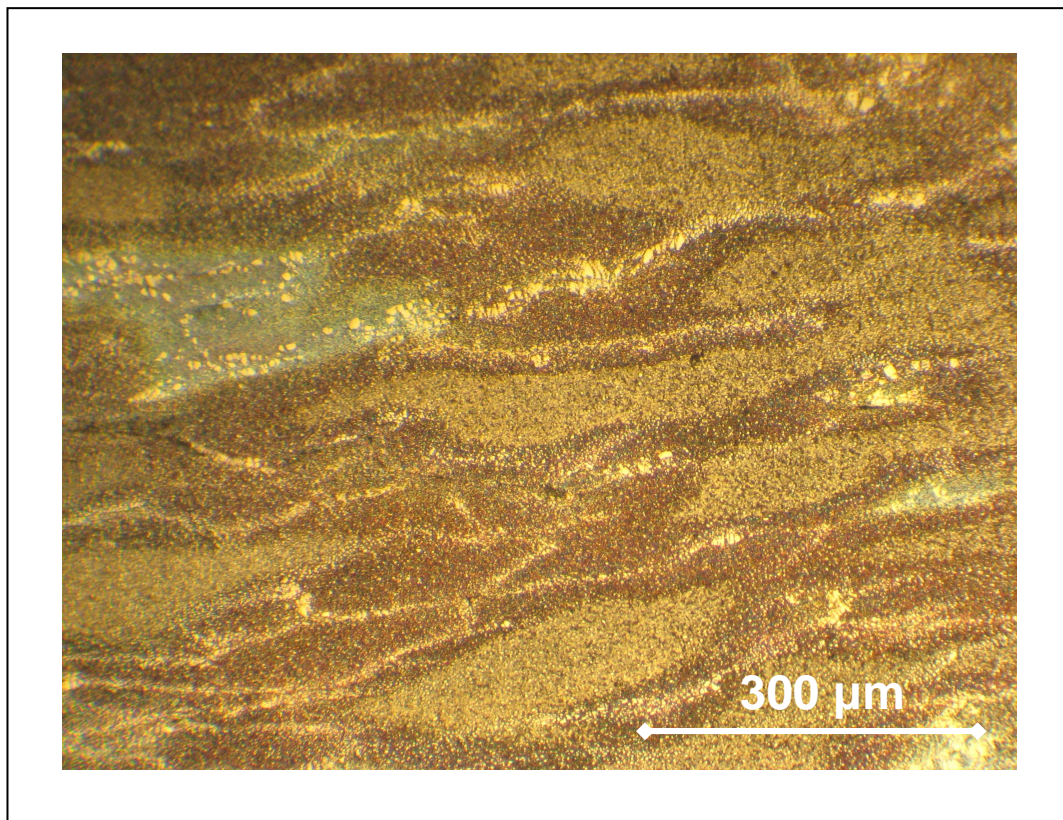


Figura.125: Detalle de la estructura de la figura.124, en el que se observan bandas de cristales de cementita proeutectoide en la dirección de laminación.

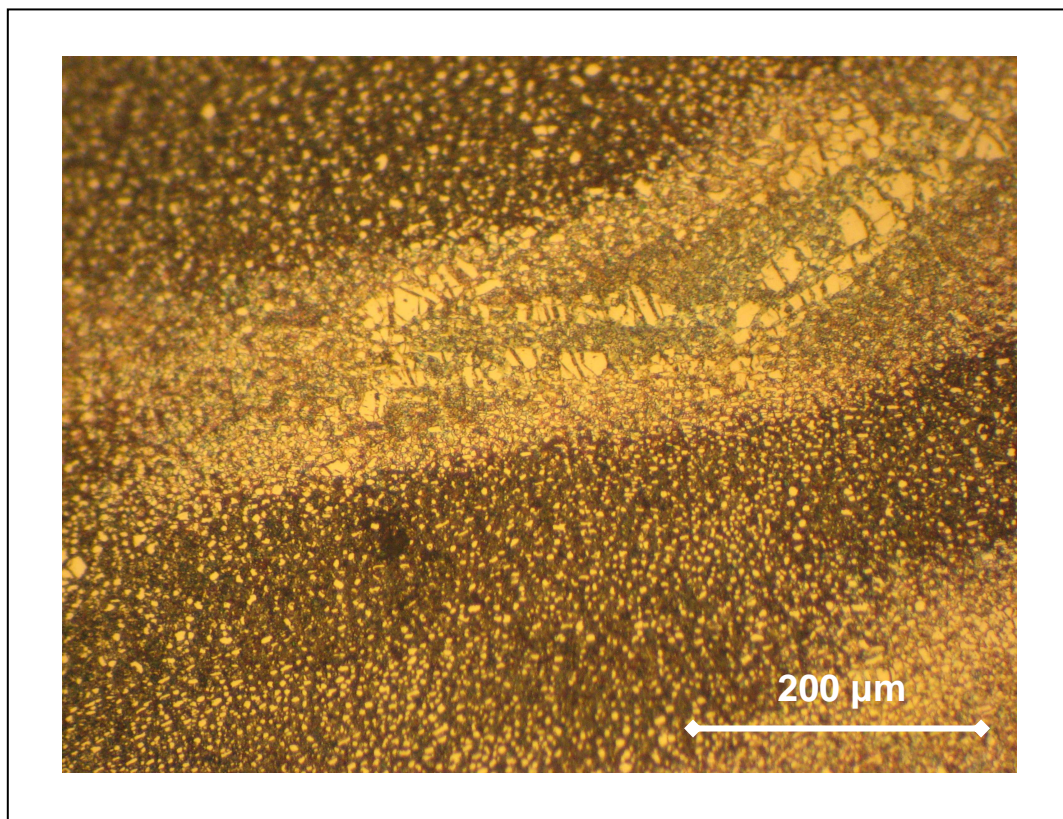


Figura.126: Detalle de la estructura de la figura.125, en el que se observa perfectamente una banda continua de cristales de cementita proeutectoide. La cementita eutectoide aparece completamente globulizada.

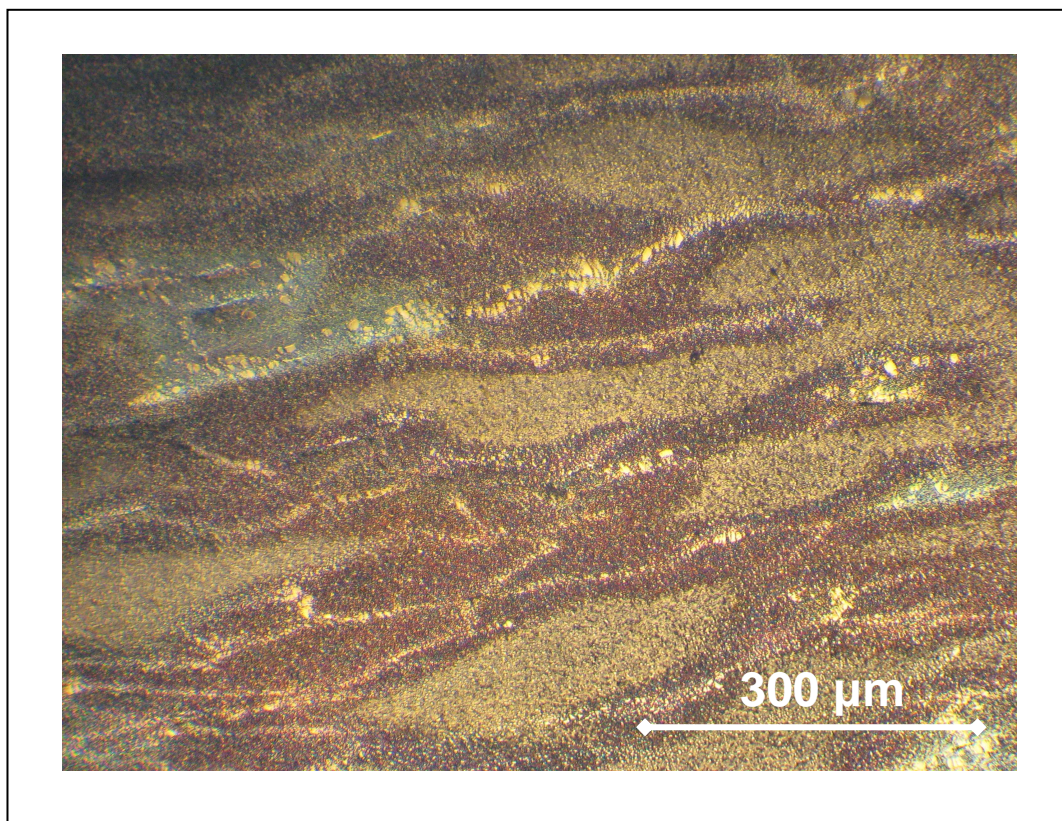


Figura.127: Se trata de la misma estructura de la figura.126, pero observada con luz polarizada. Se dibujan, perfectamente, las bandas de carburos proeutectoides, responsables de las bandas visibles a simple vista.



Figura.128: Puñal de acero de Damasco, fabricado por laminación, acabado por forja manual con martillo y acicalado, fabricado por nosotros en el laboratorio. El ataque químico se realizó con Nital al 4%.

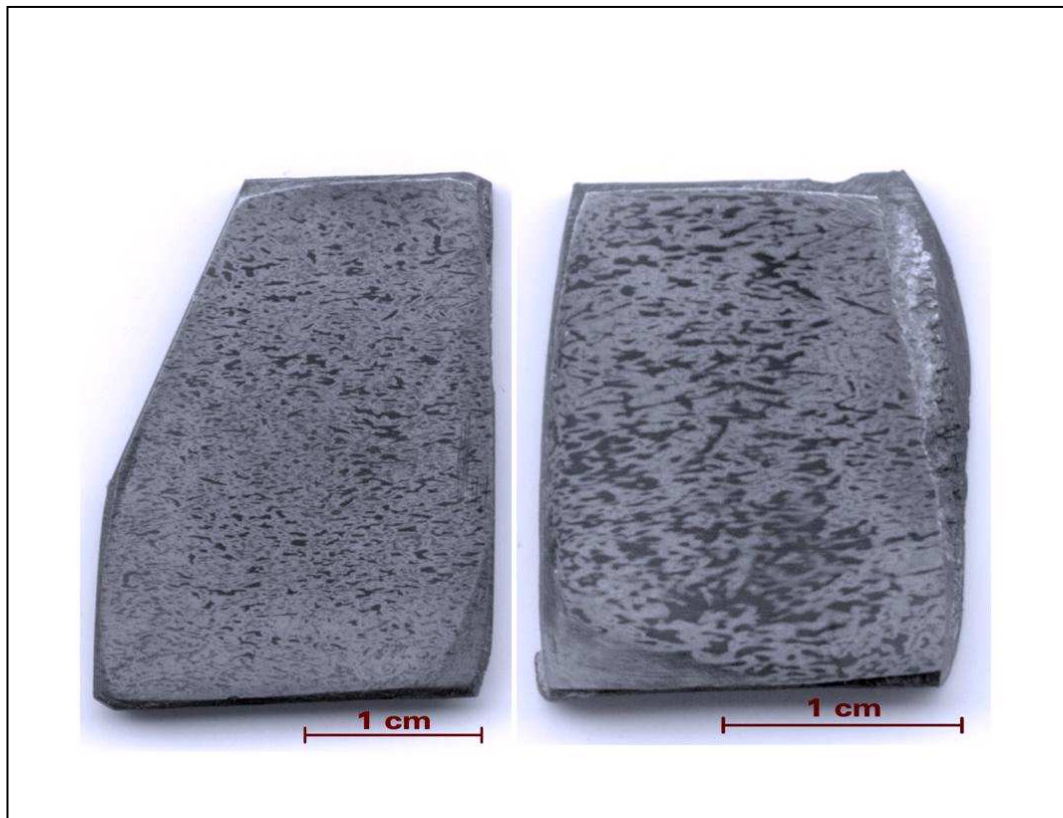


Figura.129: Probetas cortadas de la pletina forjada del puñal de la Figura.128, antes de hacerle la espiga para la empuñadura. En las macros se observan las bandas de tipo mediano de cristales de cementita proeutectoide.

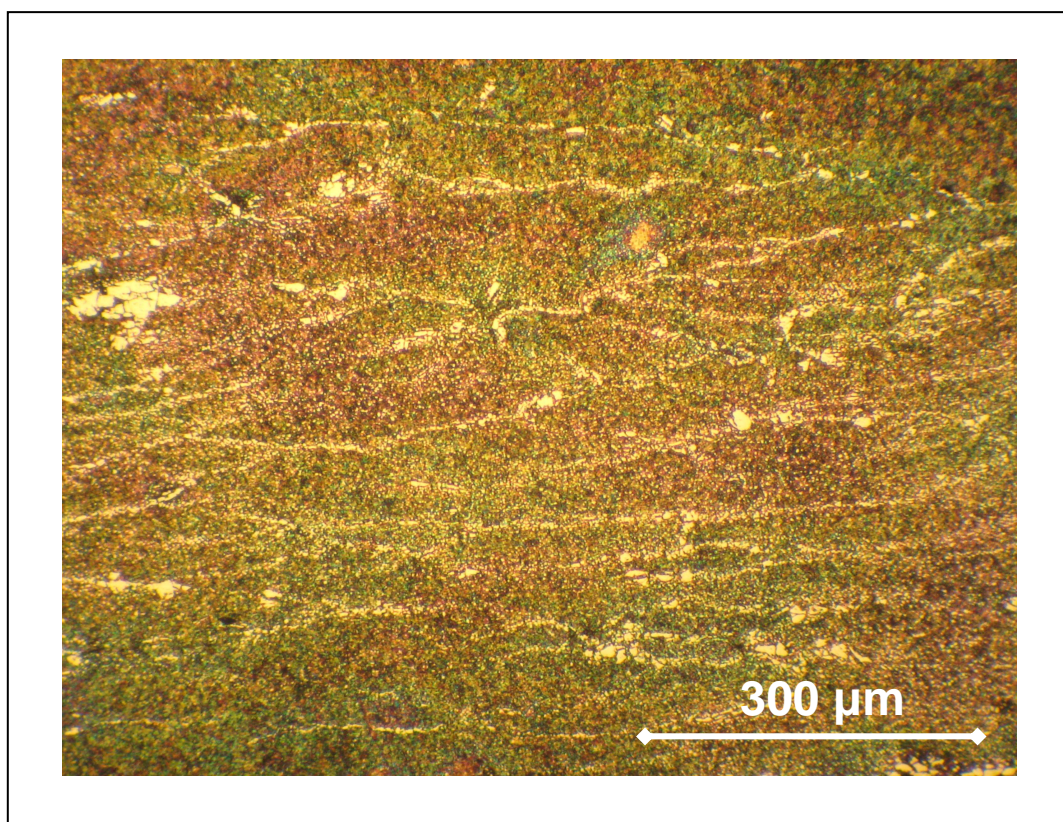


Figura.130: Detalle de la estructura de la figura.129, en el que se observan bandas de cristales de cementita proeutectoide alineadas en la dirección del alargamiento del puñal durante la forja manual con martillo.

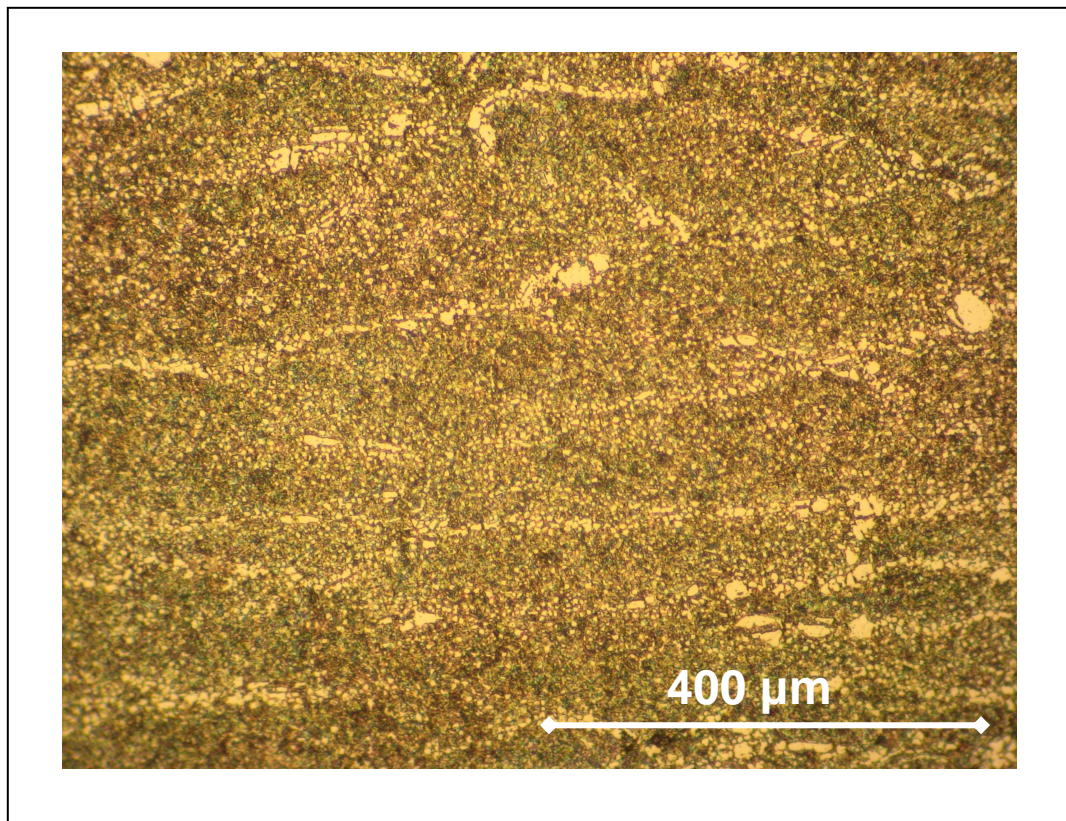


Figura.131: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura observada en la figura.130, en el que se observa con claridad la sarta de carburos primarios, muy fragmentados y globulizados.

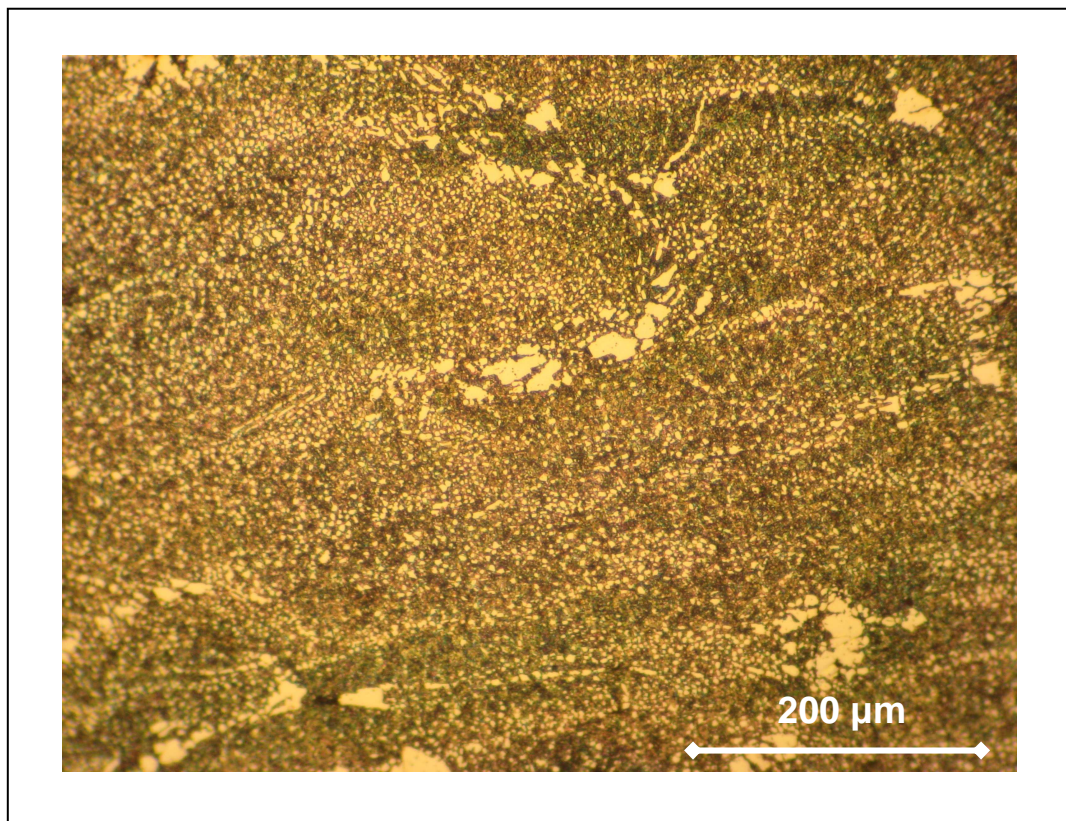


Figura.132: Detalle de otra zona de la estructura de la figura.130, en el que se observan las sarts de carburos con direcciones más irregulares que en la figura.131.

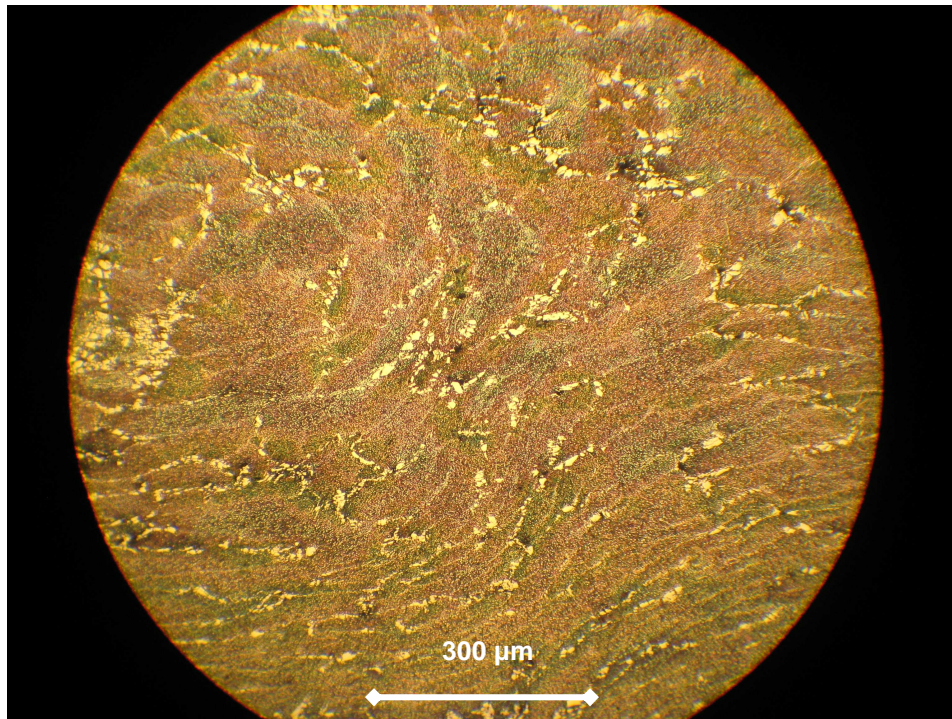


Figura.133: Otra zona de la estructura metalográfica del puñal de la figura.128. Se observa, claramente, un bucle en las bandas de cristales de cementita proeutectoide, típico de los aceros de Damasco.

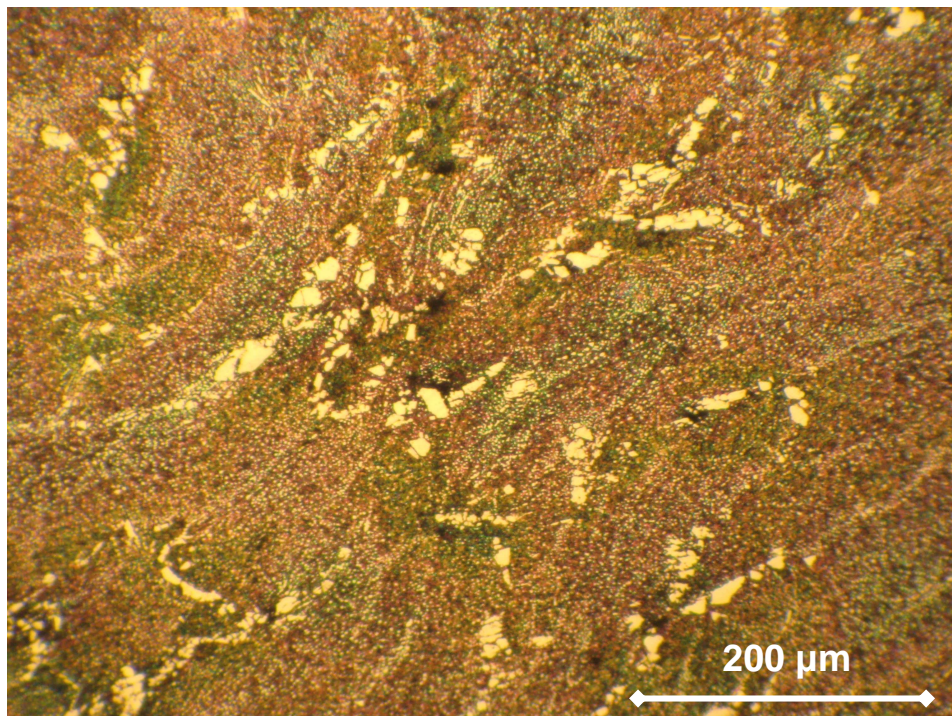


Figura.134: Detalle de la estructura de la figura.133, en el que se localiza la zona del potente martillazo que provoca el bucle en las bandas de carburos.

En la pieza forjada pueden aparecer zonas heterogéneas entre sí; sobre todo es de esperar diferencias entre las capas más superficiales y las del núcleo interior. Cuando se forja con martinete (martillo o macho pilón) o maza (martillo) manual, el esfuerzo máximo se aplica en el momento de contacto del martillo con la superficie metálica e inmediatamente, en segundos, se anula el esfuerzo, queda absorbido por las capas más superficiales. Esto quiere decir que las capas más intensamente deformadas son las superficiales.

En el caso de la forja por prensado, el método más ampliamente utilizado en la actualidad, el esfuerzo se va absorbiendo progresivamente por el metal conforme progresa la deformación, hasta que desaparece el esfuerzo. Esto implica una deformación mejor repartida en profundidad.

Pues bien, en el caso de la forja tradicional, las capas periféricas quedan más deformadas; lo que equivale a una mayor, más eficaz y rápida globulización; además, de una fractura muy intensa de los carburos primarios. La energía mecánica de deformación plástica acumulada en el metal, con preferencia en las capas más superficiales hace que se activen los mecanismos de difusión durante los intervalos de calentamiento. Tanto es así, que los cristales primarios de carburo de hierro se hacen más pequeños y se globulizan muy rápidamente. A la vez, los pequeños carburos globulizados de cementita eutectoide comienzan a crecer por efecto de la difusión, los más grandes a expensas de los más pequeños ^[127]; llegando un momento, en el que los carburos primarios globulizados y los de procedencia eutectoide alcanzan tamaños menos dispares. Esto trae como consecuencia que el dibujo de las bandas características de estos aceros de Damasco se difuminan (Figuras. 135-141).

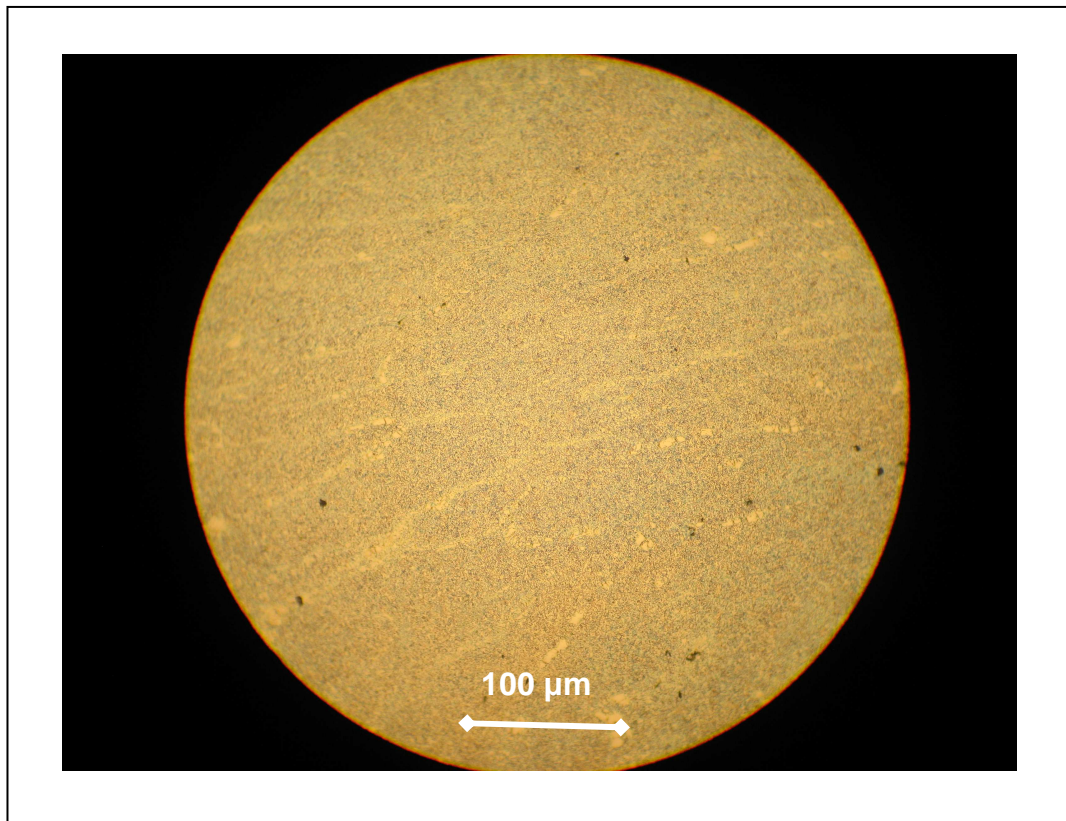


Figura.135: Estructura de las capas más superficiales, de un acero de Damasco, forjado a mano, en el que se ha producido una fragmentación muy intensa de los cristales de cementita proeutectoide, y una globulización bastante completa de éstos.

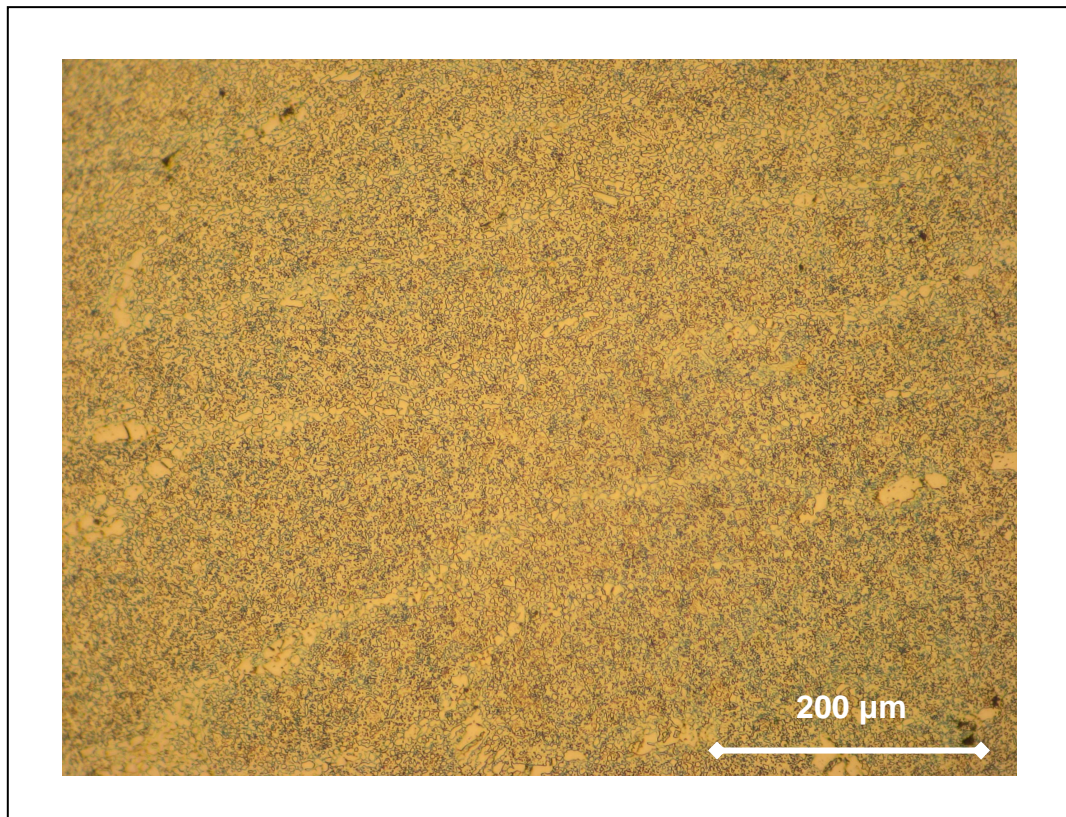


Figura.136: En este detalle de la estructura de la figura.135, se puede observar cómo apenas se distinguen las sartas de cristales de cementita proeutectoide.

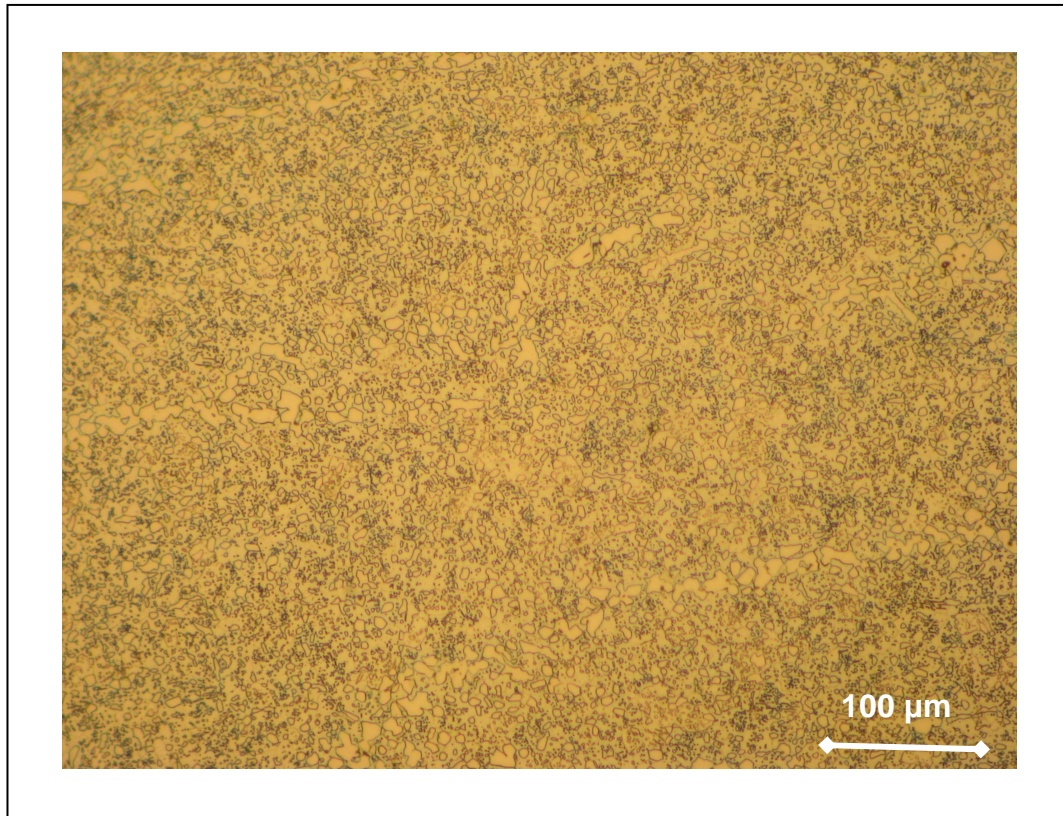


Figura.137: Detalle de la estructura de la figura.136, en el que se puede ver, claramente, el fino tamaño de los carburos primarios, que casi se confunden con los cristales de cementita eutectoide que han recrecido durante el proceso de forja.

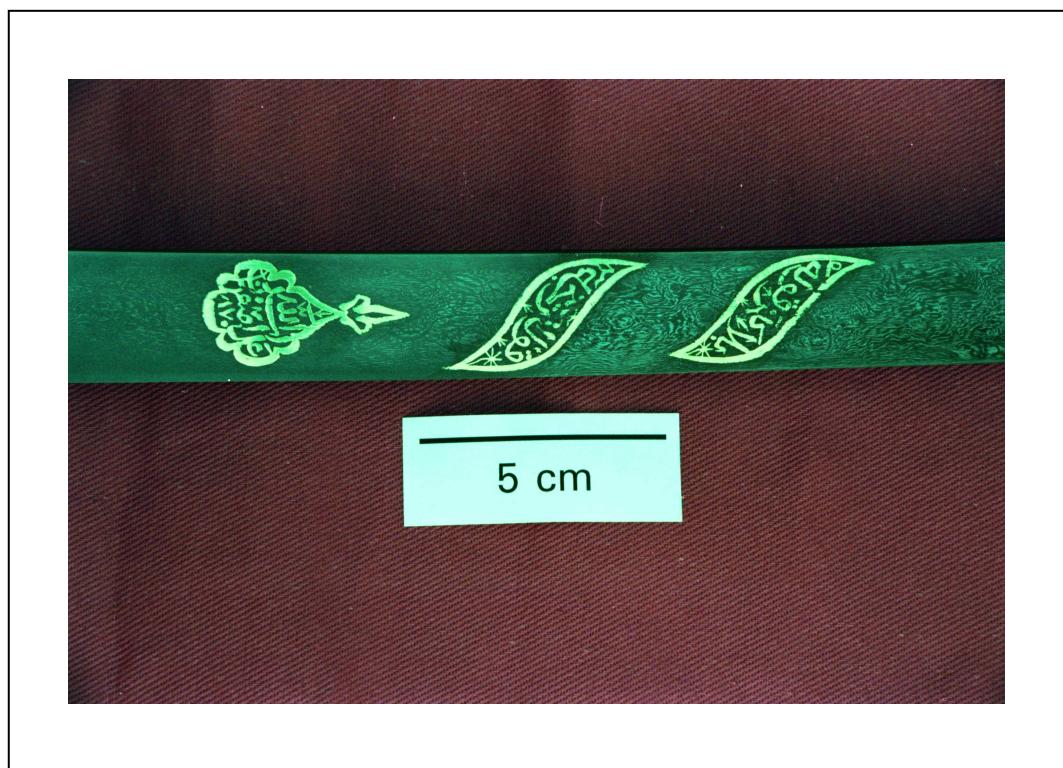


Figura.138: Se trata de la parte cercana a la empuñadura del shamshir de Mehemet Alí. Obsérvese hacia la izquierda de la imagen, en la zona próxima a la empuñadura, cómo se desvanecen a la vista las bandas de carburos. Aquí el acicalado final apenas ha eliminado las capas más superficiales.

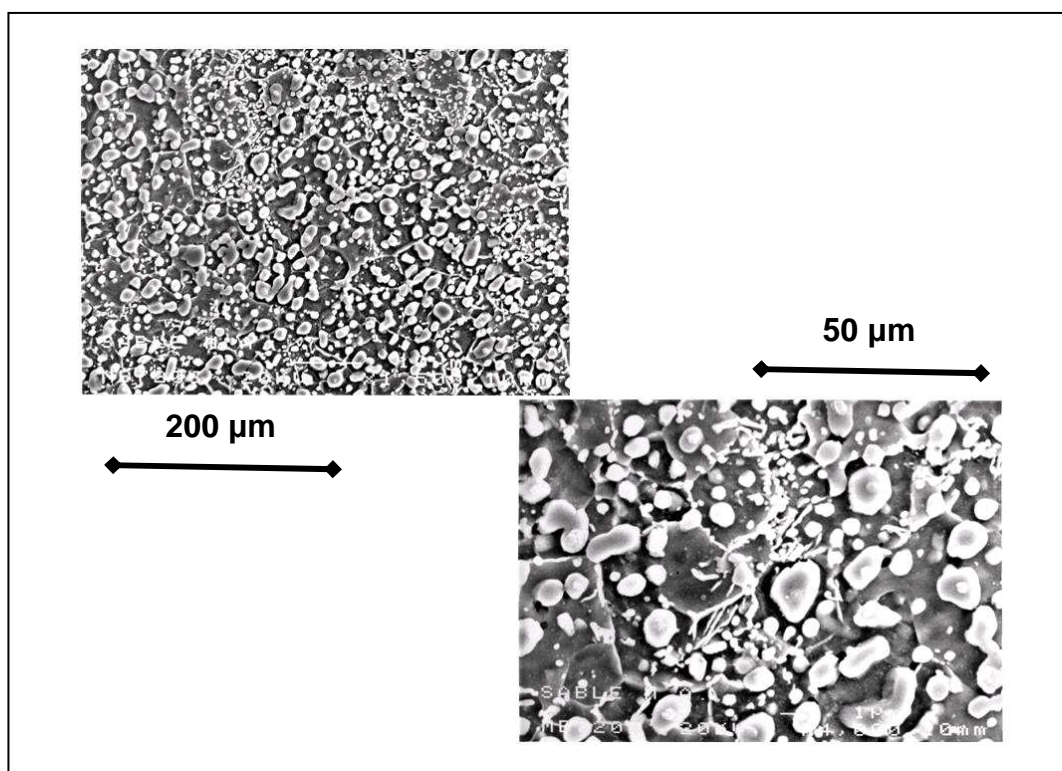


Figura.139: Microestructura de la zona cercana a la empuñadura de la figura.138, mostrando carburos de hierro homogéneamente distribuidos, de pequeño tamaño y difíciles de predecir su origen. Esto trae como consecuencia una imagen difuminada de las bandas.

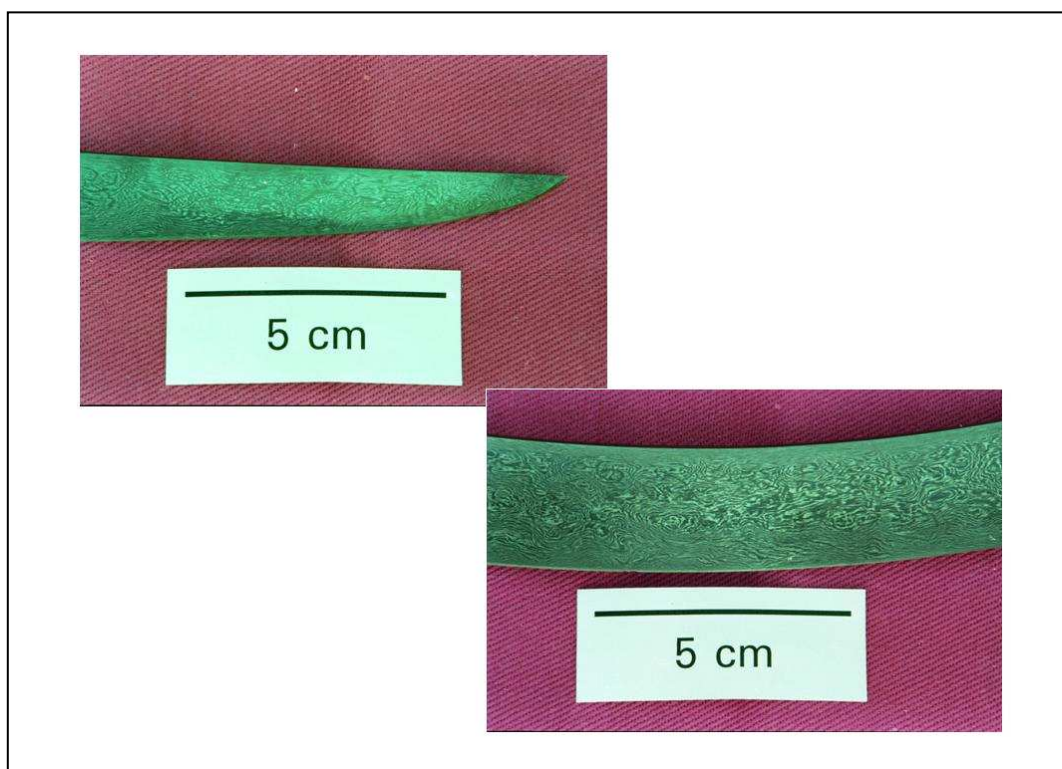


Figura.140: Se trata de las zonas centrales y de la punta del shamshir de Mehemet Ali. Obsérvese cómo se ven las bandas de forma muy nítida, ya que en el acicalado final y factura del filo, se han eliminado las capas superficiales más difusas.

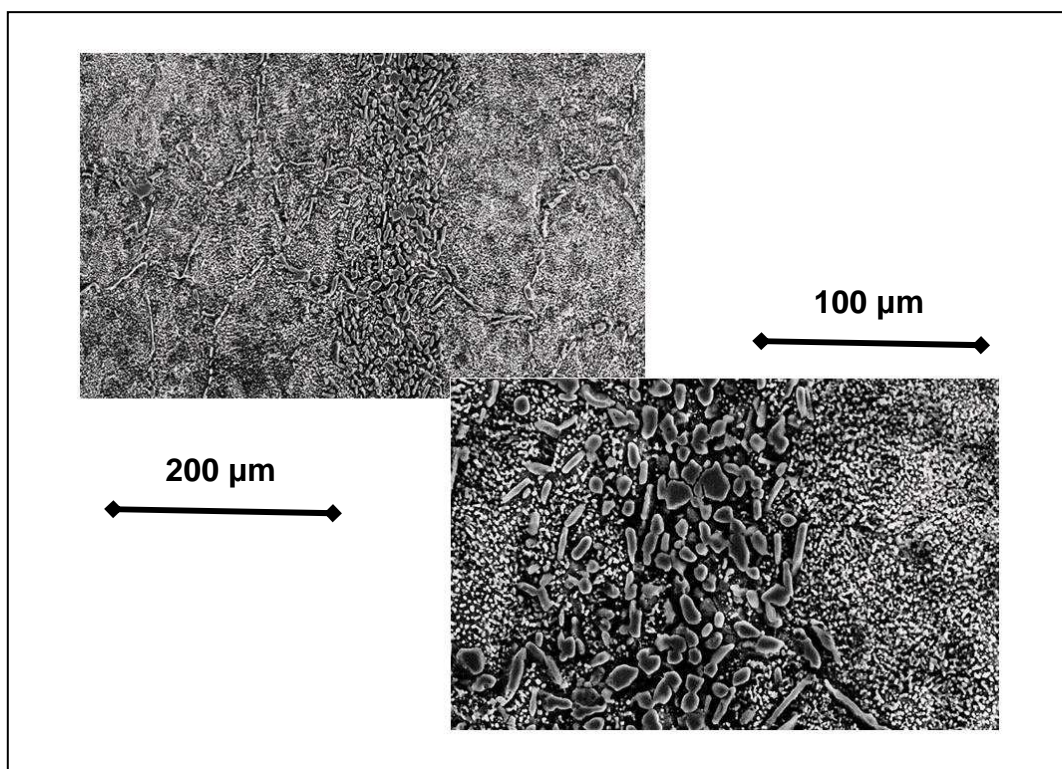


Figura.141: Microestructura de la zona central y de la punta de la figura.140, mostrando una banda clara de cristales de cementita proeutectoide, con tamaños muy diferentes de los cristales de cementita eutectoide. Esto trae como consecuencia una visión clara de las bandas claras y oscuras.

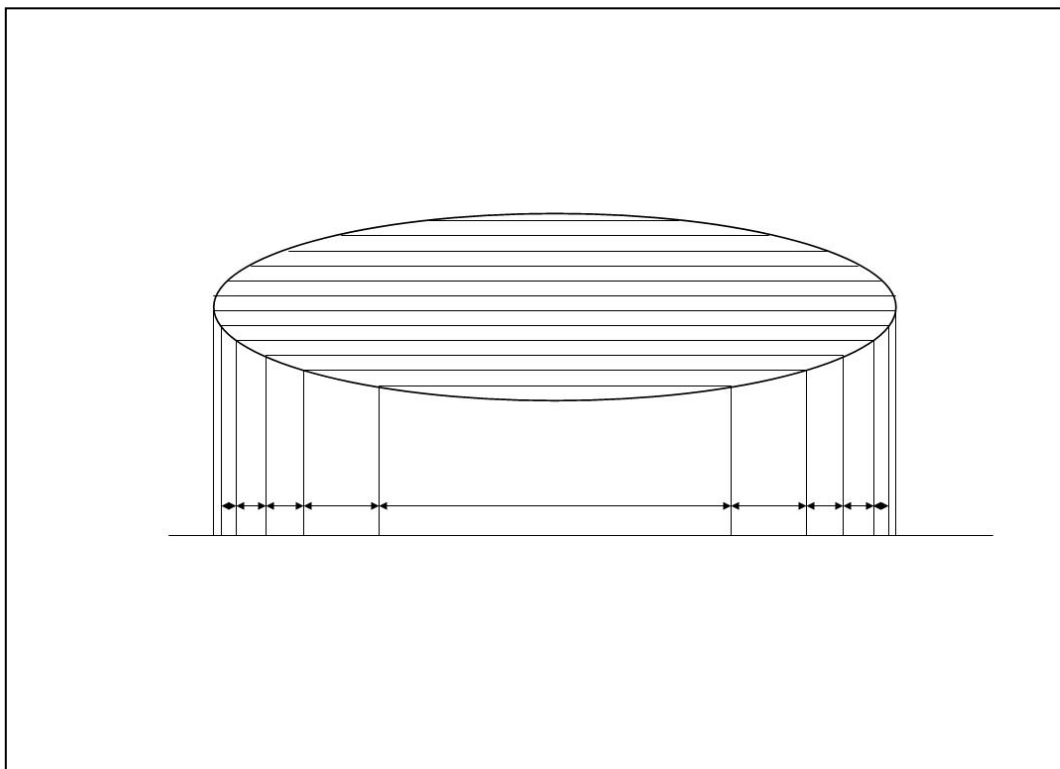
Para que podamos observar estas bandas en todo su efecto óptico es necesario quitar esas capas superficiales con la piedra de agua y el esmeril. Es, por tanto, durante el acicalado del arma, llevándole a su forma geométrica de diseño, realización del filo y acabado de la superficie, cuando llegamos a las espléndidas aguas claras y oscuras del corazón del arma. (Figuras.138 y 140).

Ésta es, sin duda, la operación más compleja para obtener la máxima eficacia mecánica y de geometría de diseño del arma. Este oficio era el mejor pagado en la fabricación de armas blancas, como todavía ocurre en Japón entre los fabricantes de katanas. El maestro que temple y pule el arma, el pulidor, es el que necesita de mayor formación y, también, el de mayor sueldo.

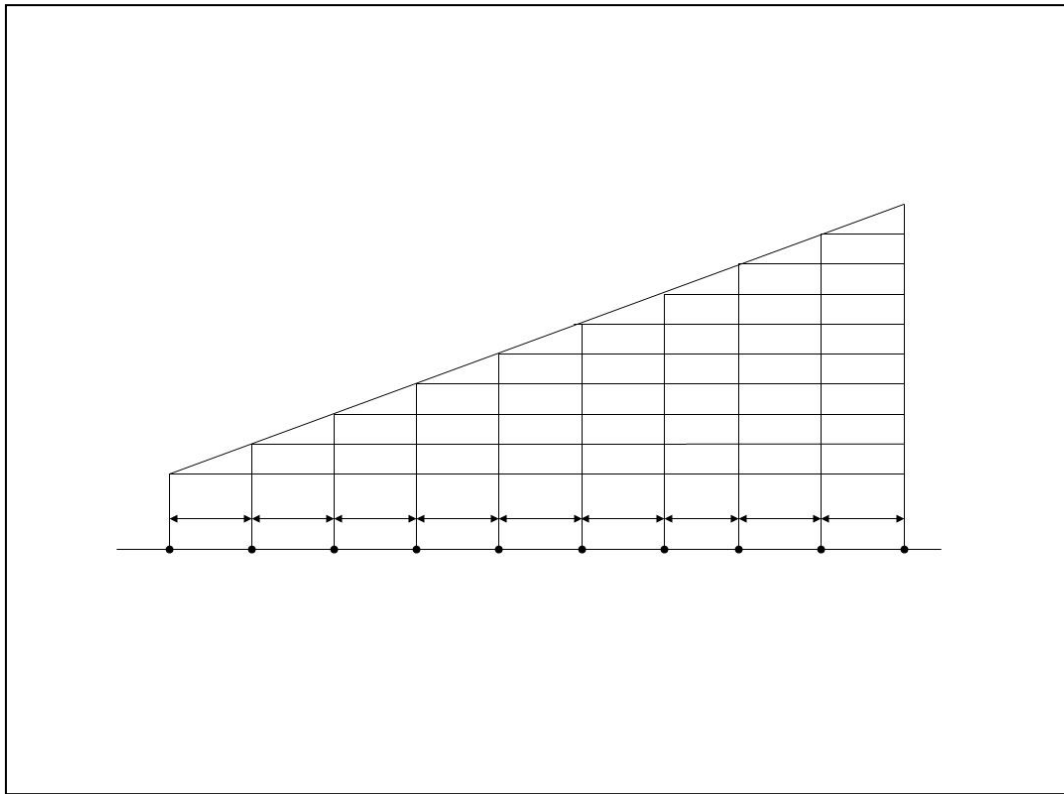
El maestro forjador hace, en numerosas ocasiones, todas las operaciones. En todo caso, es importante que la forja haya sido correcta. Si esto es así, en la operación de acicalado se aumentará la eficacia del arma y su estética. Si, fuera el caso contrario, el acicalado no podría disimular los defectos intrínsecos a la forja. Como dice el dicho popular: “aunque la mona se vista de seda, mona se queda”. En el caso contrario de una mujer bella, el acicalado correcto, le proporcionará una belleza más espléndida y un poder de seducción muy superior.

Por último, resaltar que la deformación plástica va provocando el aplastamiento y alargamiento de las capas metálicas, lo que produce una macroestructura de capas evidentes como en el caso de los Damascos soldados (Figuras. 4 y 5).

Esto provoca que en los bordes del arma forjada y acicalada se vea este perfil que presenta un espaciado entre bandas mucho más fino que en el centro (Figura.140):



En el caso del perfil inclinado del filo se consigue unos espaciados entre bandas muy homogéneos (Figura.140):



Este hecho que hemos reflejado con esas figuras geométricas, y que reflejan lo observado en el shamshir de Mehemet Alí (Figuras.138 y 140), se puede ver metalográficamente en un corte de perfil de las muestras de la figura 129.

La estructura está formada por láminas paralelas que se forman por fluencia del acero en caliente durante su conformación plástica por forja, tanto por laminación como martillo. En el caso de la forja con martillo se producen hundimientos locales de estas capas que dan origen a los bucles observados en las bandas de carburos superficiales (Figuras.142-148).

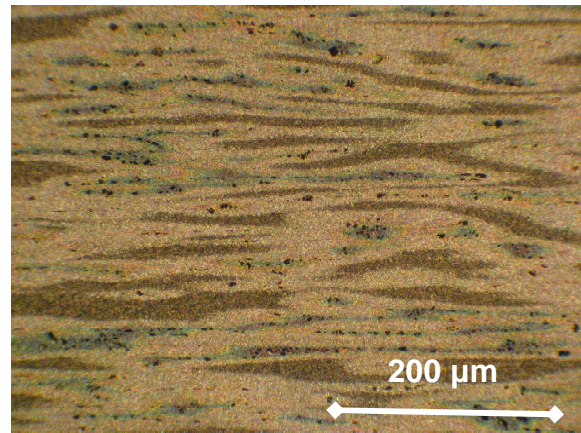
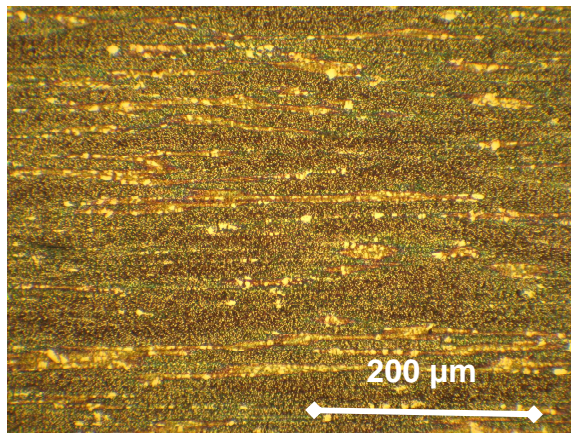


Figura.142: Estructura en láminas paralelas alternadas de carburos de diferentes tamaños, que se observa en una sección del perfil de las muestras de la figura 129. La imagen de la derecha está obtenida con campo oscuro.

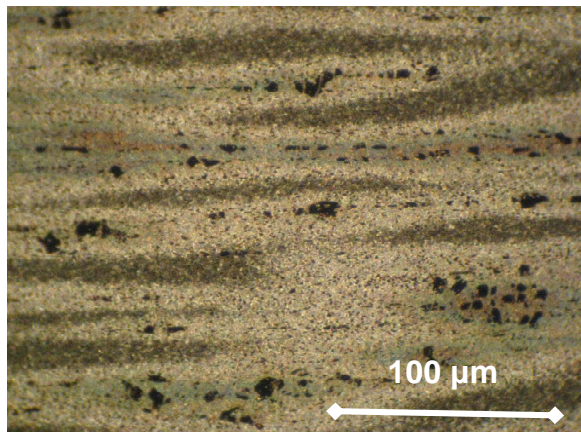
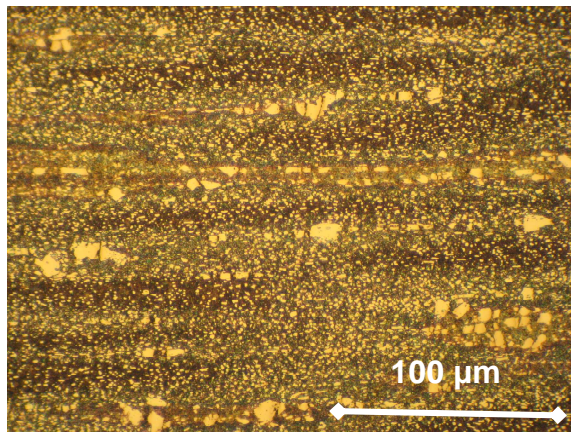


Figura.143: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura de la figura 142. Se observa perfectamente la estructura en láminas paralelas. La imagen de la derecha está obtenida en campo oscuro.

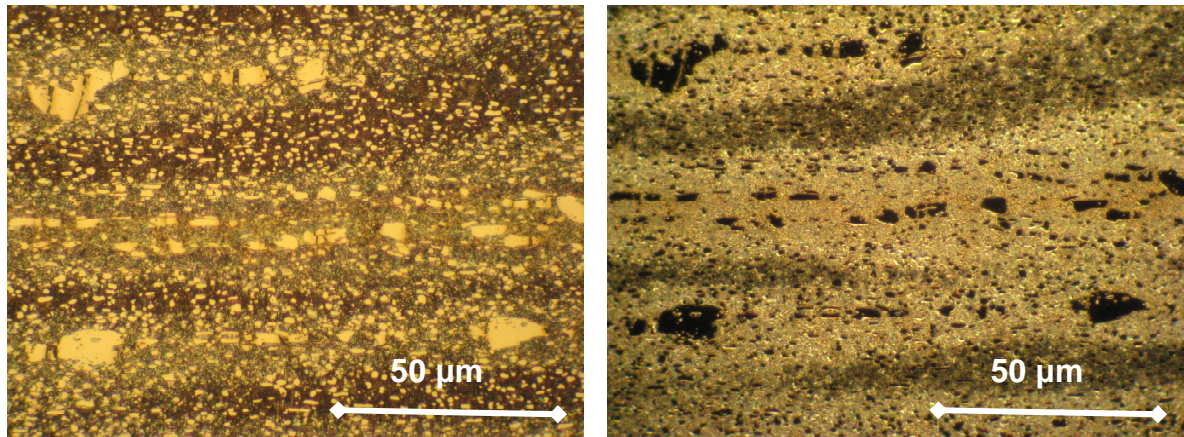


Figura.144: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura de la figura 143. La imagen de la derecha está obtenida con campo oscuro.

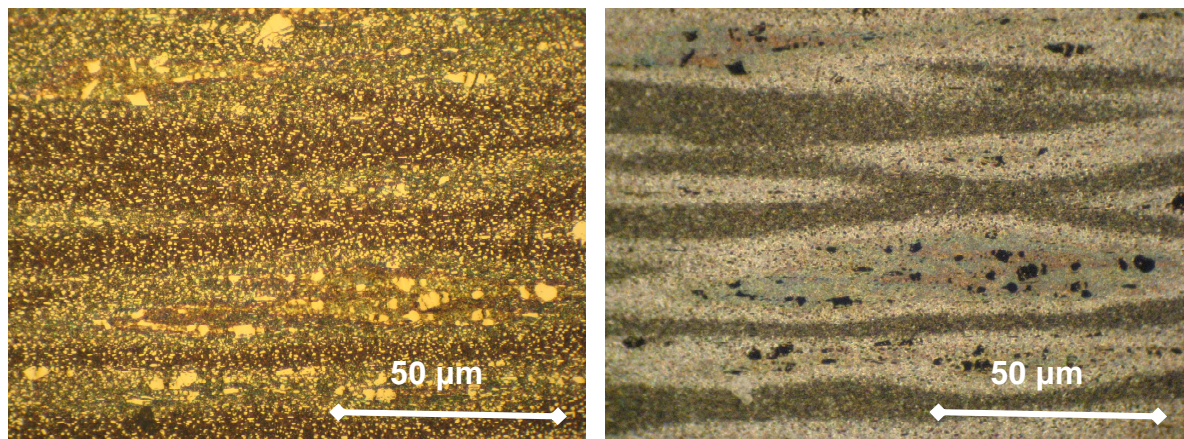


Figura.145: Detalle de otra zona de la estructura de la figura 142. Se observa, claramente, la morfología de láminas paralelas. La imagen de la derecha ha sido obtenida con campo oscuro.

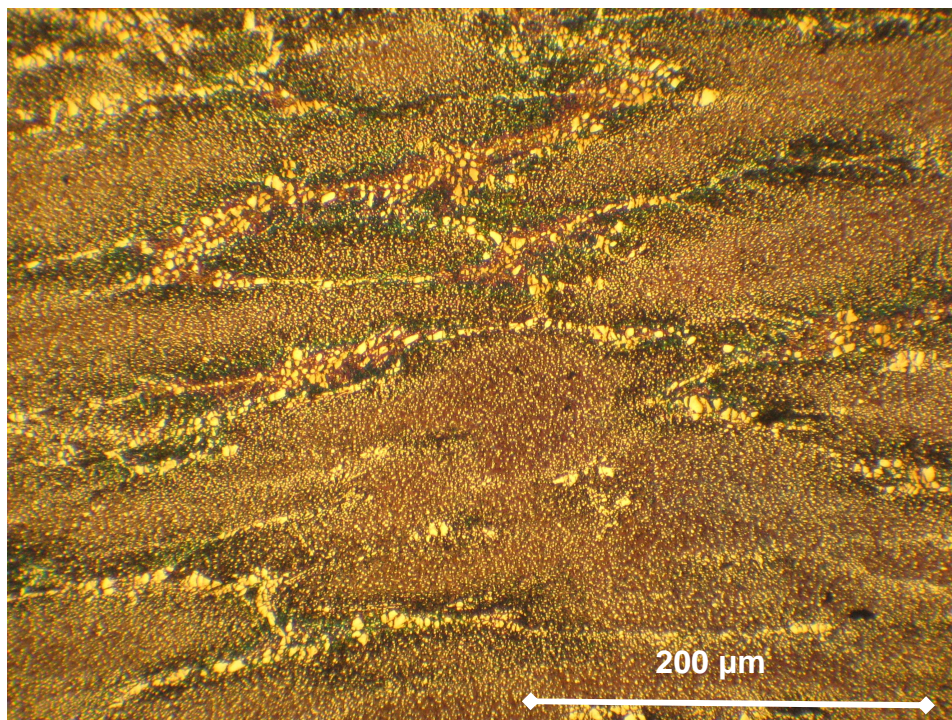


Figura.146: Estructura de la superficie exterior que se observa en las muestras de la figura 129. Al ser la cara exterior y no el perfil, se observan claramente las bandas de carburos con formas sinuosas, al contrario del corte de perfil (figuras 142-145).

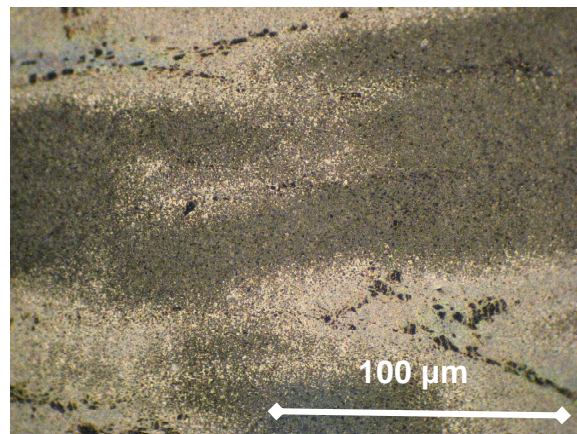
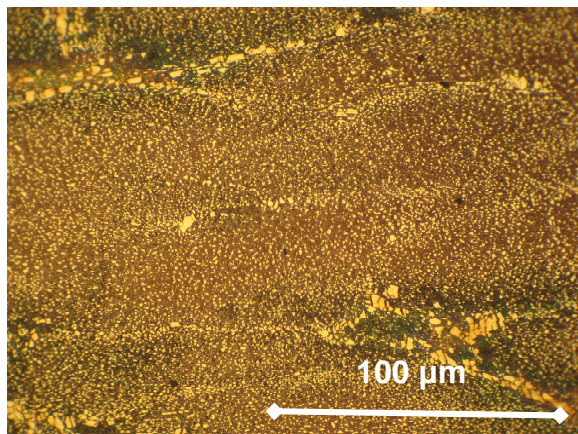


Figura.147: Detalle de la estructura de la figura 146, en el que se observan las bandas sinuosas de carburos de hierro y el enorme espaciado entre ellas. Compárese con las descritas en las figuras 142 a 145. La imagen de la derecha ha sido obtenida con campo oscuro.

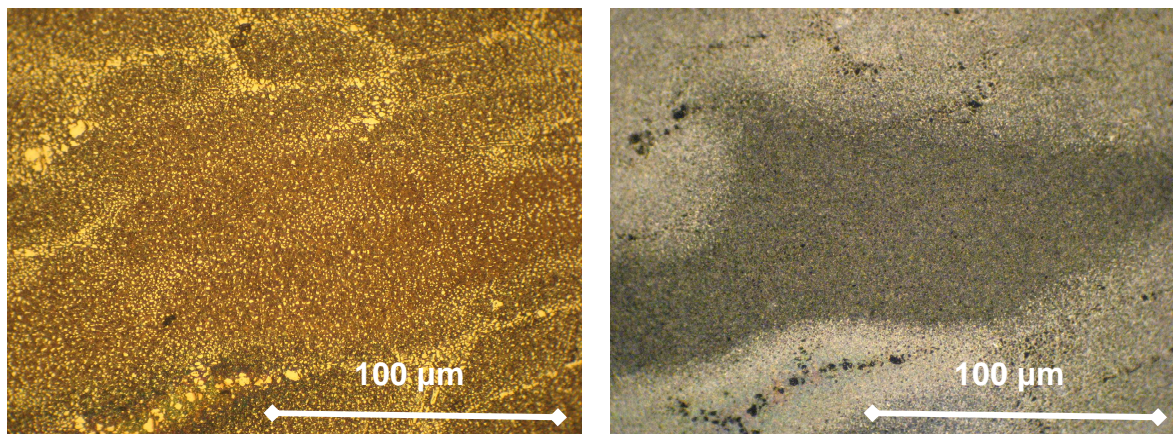


Figura.148: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura de la figura 147. Se observa la enorme separación entre las bandas de carburos de hierro en la superficie de la muestra y la no linealidad ni paralelismo entre ellas. La imagen de la derecha está obtenida con campo oscuro.

Para completar esta discusión, es necesario dejar claro que en la forja manual con martillo (no es el caso de la laminación), las láminas no quedan completamente planas y paralelas, sino que presentan abolladuras localizadas debido a los martillazos contundentes. Estos golpes, con las deformaciones consecuentes, hacen emerger unos planos sobre otros, de forma localizada, hacia arriba y hacia abajo; dibujando en la superficie exterior contornos sinuosos, como de remolinos. Parecen, más bien, planos topográficos; icebergs que emergen o se hunden.

Un hecho muy importante, ocurrido en la historia de los estudios sobre los aceros de Damasco, lo protagonizó B. Zschokke^[80]. Al final del siglo XIX y principios del XX, el famoso explorador y coleccionista suizo Henri Moser, acumuló una colección de 2000 piezas de hojas de acero de Damasco. Este Henri Moser, cuya colección se encuentra en el Museo Histórico de Berna (Suiza), donó a Zschokke, dos puñales y cuatro espadas. Los estudios de Zschokke son dignos de destacar y referencia para cuantos estudiamos sobre los aceros de Damasco; ya que pudo “romper y destruir” seis joyas damasquinas para estudiarlas. Les realizó análisis químicos y metalográficos, y los publicó en la “Revue de Metalurgie” en 1924. De esto ya hemos hecho referencia en la introducción. Aquí queremos traer las micrografías que él publicó en dicha revista. Son únicas, como las que tenemos del shamshir de Mehemet Alí, ya que fueron obtenidas de auténticas e históricas armas blancas fabricadas con acero de Damasco (Figuras. 149 y 150). Las macrografías y micrografías de la publicación no son de gran calidad; aunque pensamos que si lo son las originales obtenidas por el científico B. Zschokke. Se trata de Damascos del tipo lineal, según la clasificación de Anossov^[19,20]. Pues bien, siguiendo la propuesta tecnología de esta tesis, hemos reproducido exactamente dichas estructuras (Figuras. 151-163). Se trata de bandas, más o menos densas, lineales, de cristales groseros de cementita proeutectoide, en una matriz oscura ferrítica con cementita eutectoide globulizada.



Figura.149: Macrografía de las espadas de acero de Damasco, de la colección Henri Moser, en la que se observan las bandas características de los aceros de Damasco persas. En la imagen tercera, empezando por arriba, se puede distinguir la escalera de Mahoma.

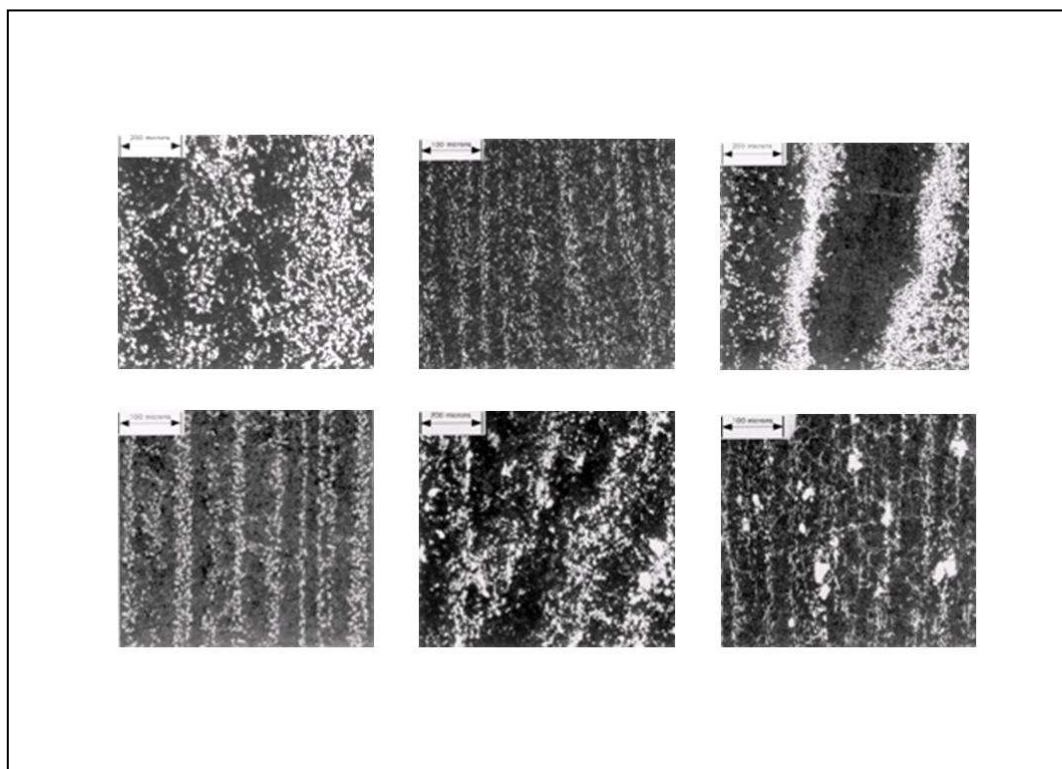


Figura.150: Micrografías publicadas por B. Zschokke^[80] en 1924 de las muestras de la figura 149. Se trata de las bandas lineales de cementita proeutectoide típica de los damascos lineales, según Anosov^[19,20].

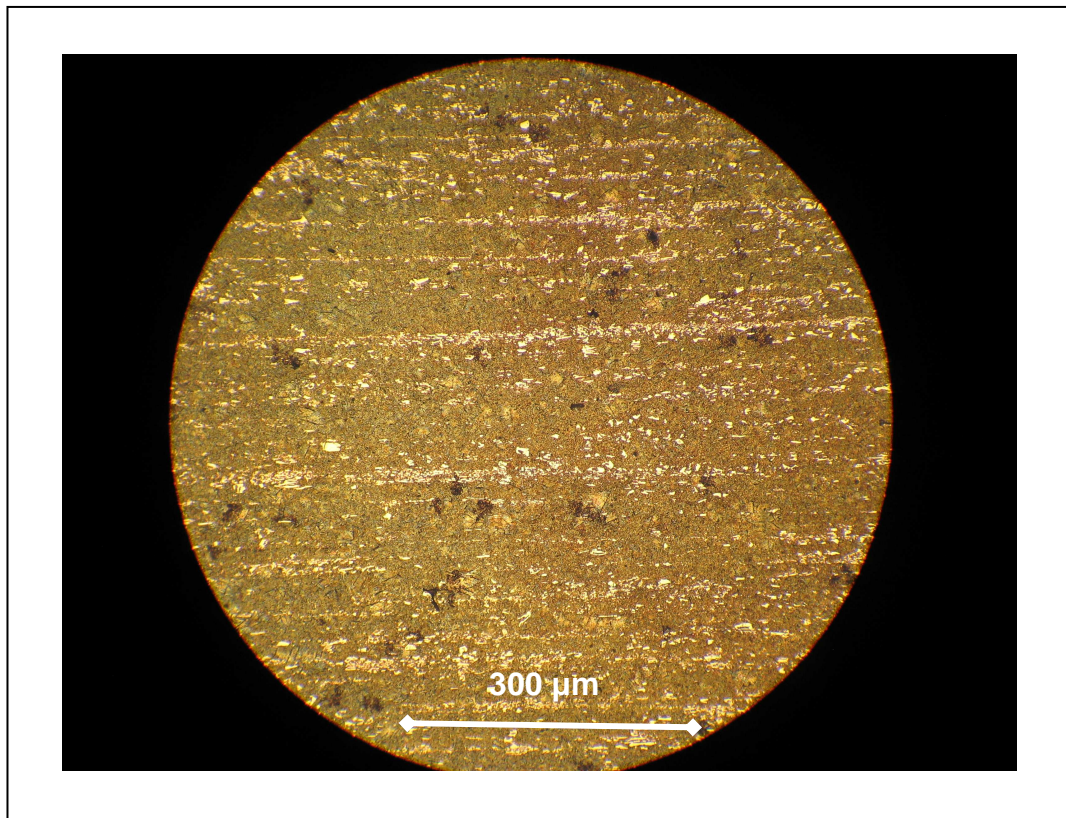


Figura.151: Estructura de un acero de Damasco con bandas rectilíneas (del tipo a)), según Anossov^[19,20], como los analizados por Zschokke^[80] y presentados en las figuras 142 y 143.

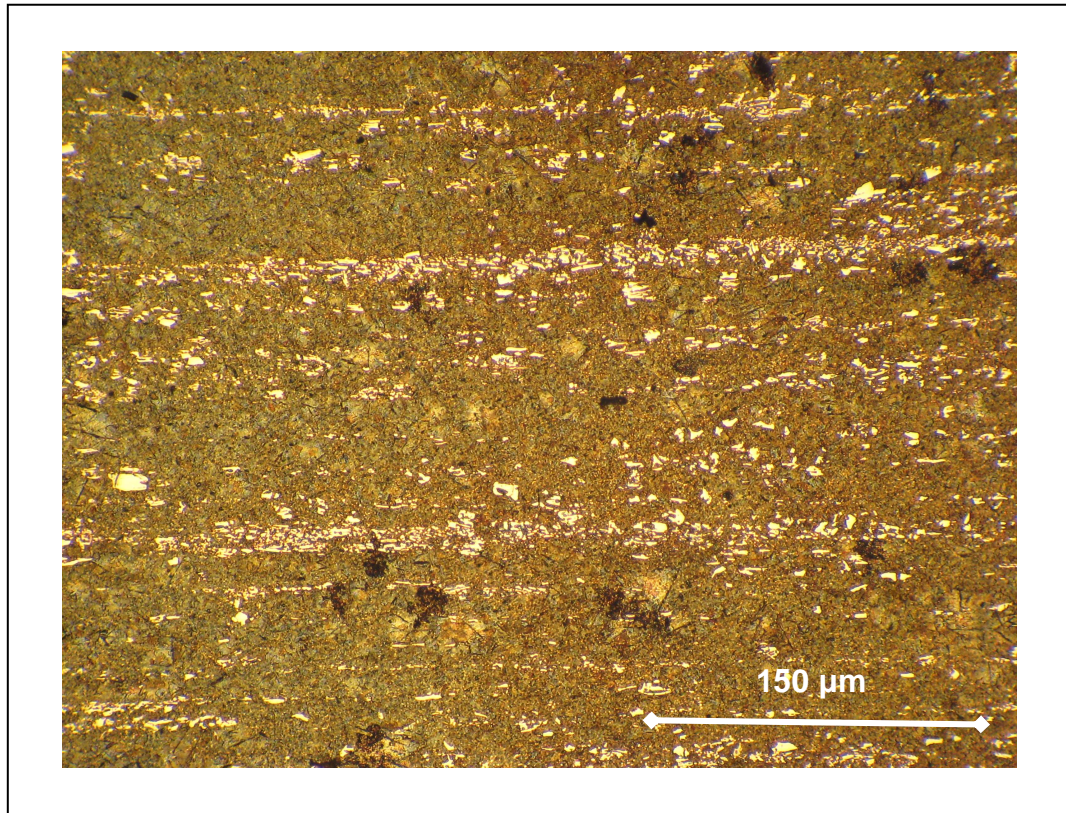


Figura.152: Detalle de la estructura de la figura 151, mostrando cristales de cementita proeutectoide alineados en bandas rectilíneas y paralelas.

Aunque la microscopia óptica aporta imágenes muy valiosas de los aceros forjados, decidimos obtener, también, micrografías de microscopia electrónica de barrido. La perspectiva no es la misma; pero sí que ofrece la posibilidad de observar las variaciones morfológicas, que se van produciendo, conforme avanza el proceso de forja. Con la forja previa, en martillo pilón o en laminadora manual, se puede observar cómo los carburos de hierro proeutectoides comienzan a triturarse de una forma más eficaz. La forja manual final contribuye a triturar algo más los carburos de hierro proeutectoides y a una mayor esferoidización (Figuras. 153-163).

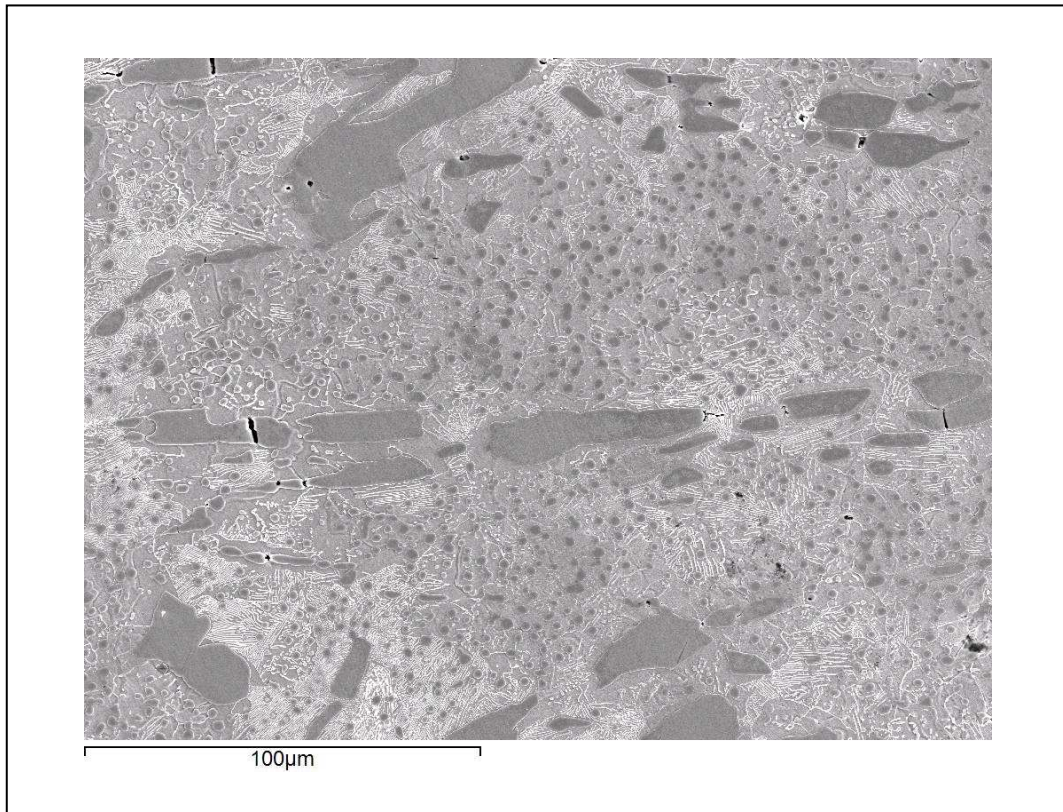


Figura.153: Micrografía obtenida mediante M.E.B., de un acero de Damasco en su etapa de forja en martillo pilón. Los cristales ya troceados de la etapa de endulzamiento, comienzan a sufrir trituración muy efectiva.

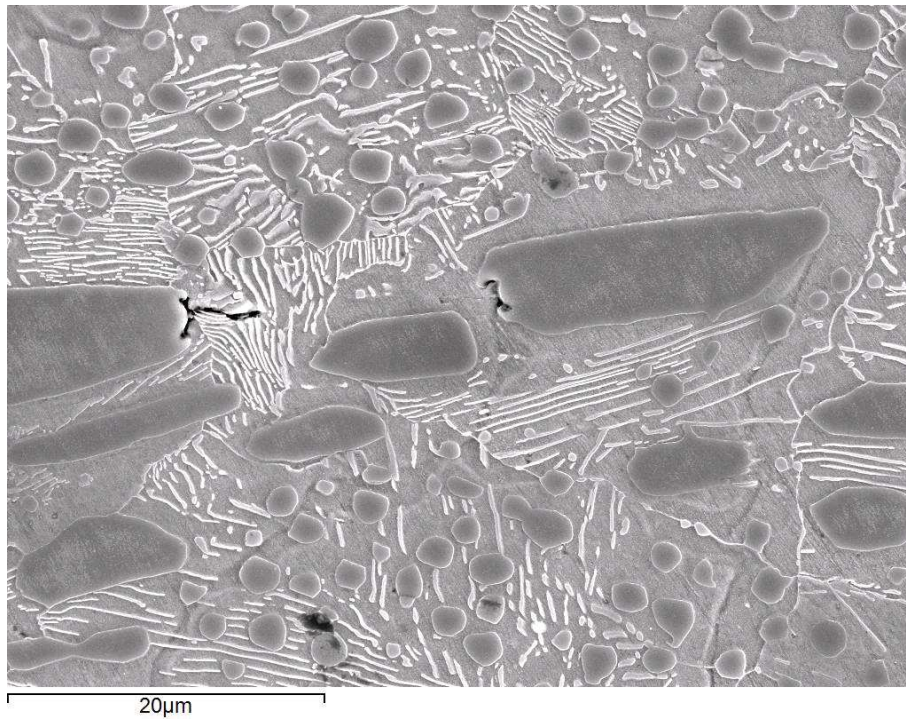


Figura.154: Detalle de la estructura de la figura 153, en la que se observa la partición de los carburos primarios y su alineación en bandas. Parte de la cementita de la perlita está globulizada. La forja entre los 650°C y 750°C hace que en el enfriamiento se siga regenerando algo de perlita.



Figura.155: Otro detalle de la estructura del acero de Damasco, en la etapa de forja en martillo pilón. Se observa, claramente, la fractura de los grandes cristales de cementita proeutectoide.

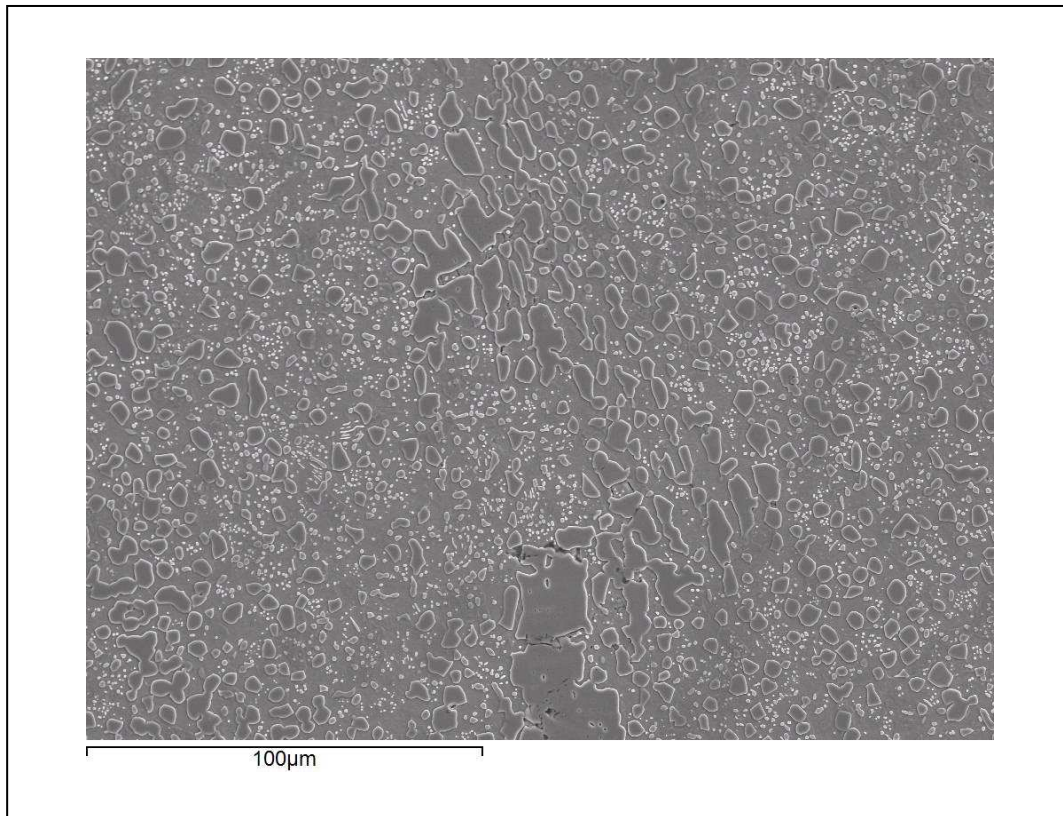


Figura.156: Microestructura final de la forja manual con bandas del tipo lineal (del tipo a) según Anosovv^[19,20]), igual a la observada por Zschokke^[80].

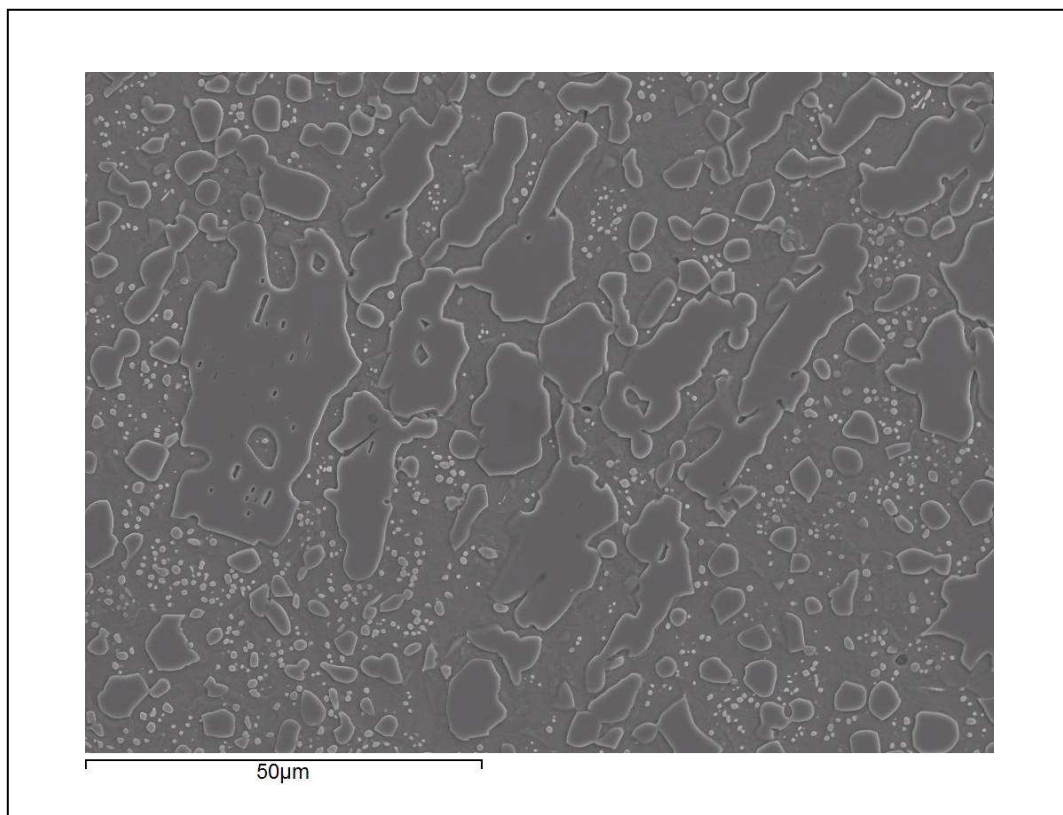


Figura.157: Detalle de la microestructura del acero de la figura 156, mostrando los cristales de cementita proeutectoide y otros cristales más pequeños y muy globulizados de cementita eutectoide.

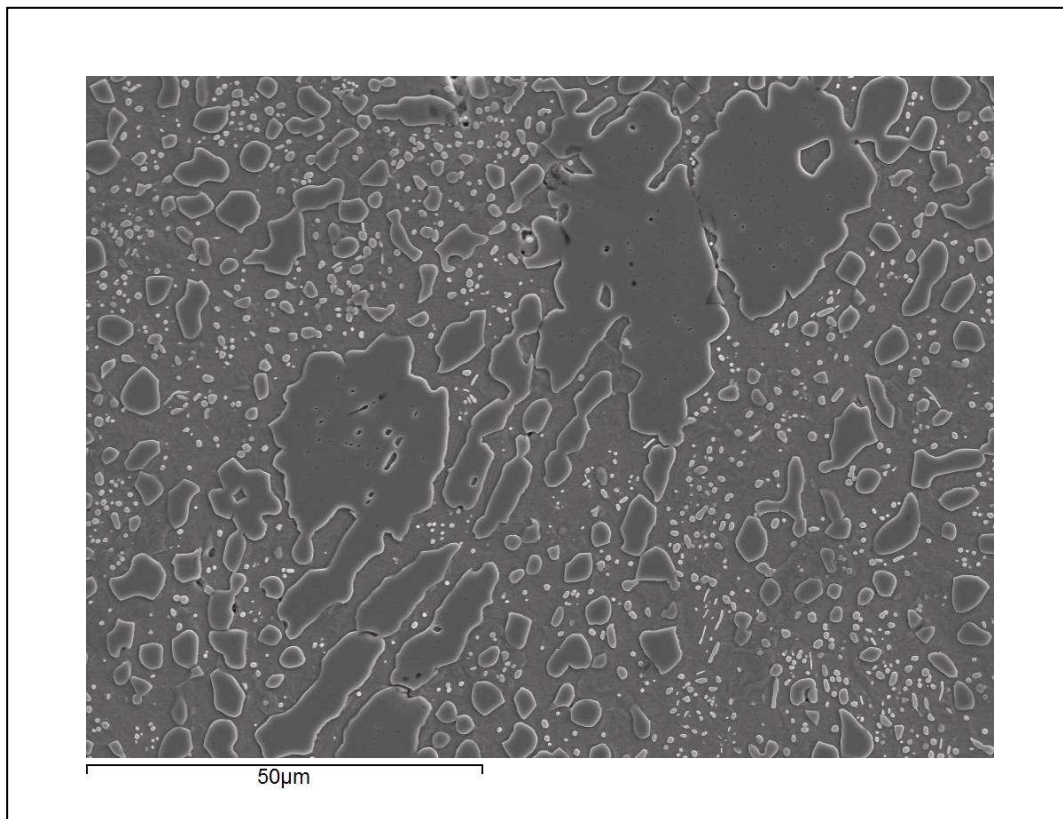


Figura.158: Otro detalle del mismo acero de Damasco tipo lineal de las figuras 156 y 157, en el que se ven con claridad los grandes cristales de cementita proeutectoide y otros más pequeños globalizados de cementita eutectoide.

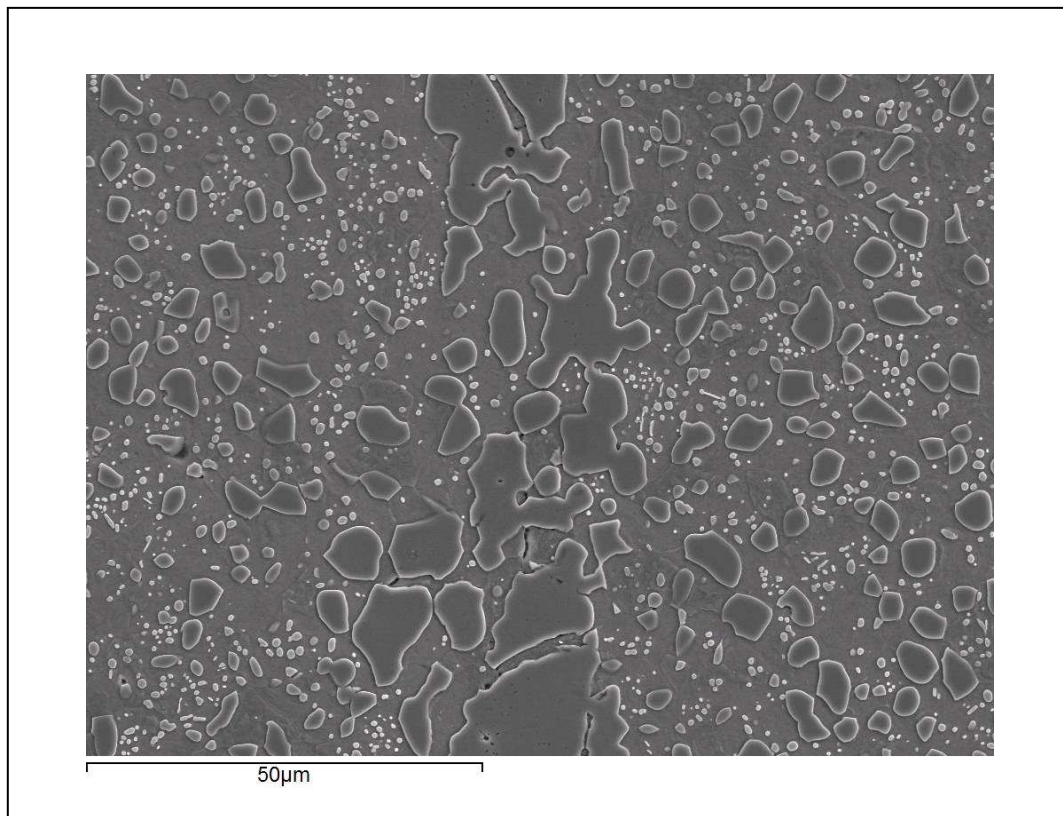


Figura.159: Otro detalle más del Damasco lineal discutido en las figuras 156 a 158.

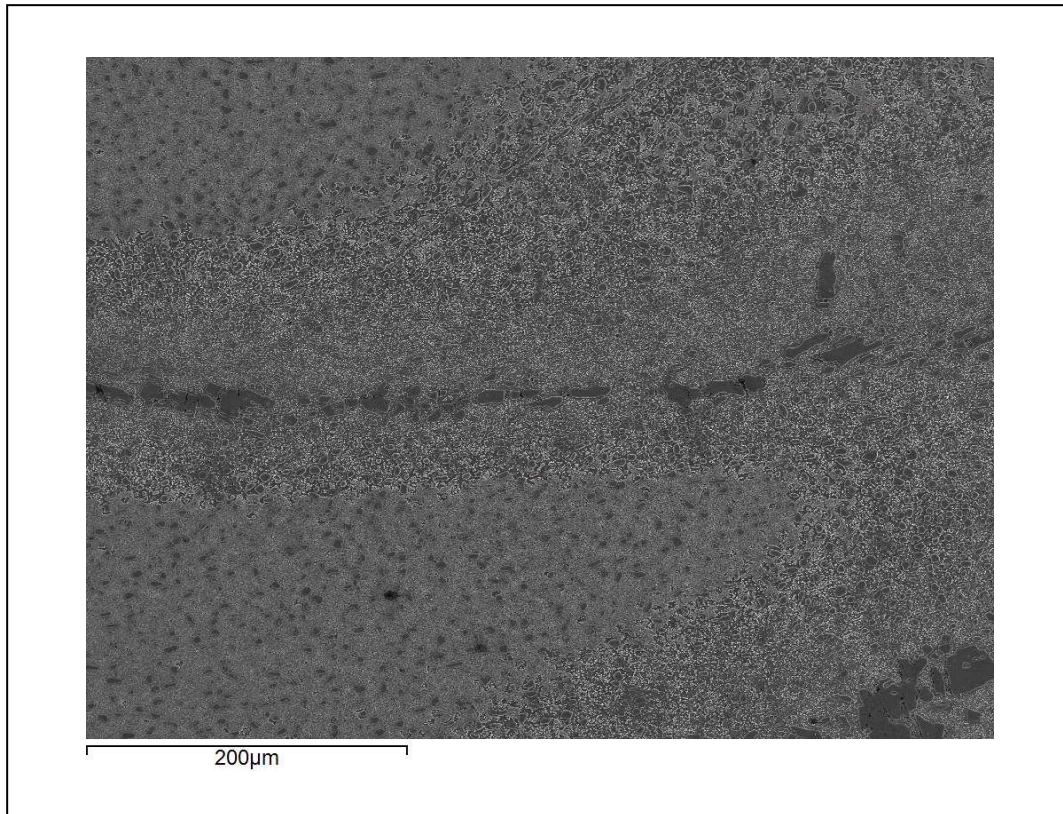


Figura.160: Microestructura de un acero de Damasco finalizado por forjado manual. Es del tipo de bandas sinuosas (tipo b)) de Anosov^[19,20]. Se observa una banda resaltada por los grandes cristales de cementita proeutectoide en el centro de ella.

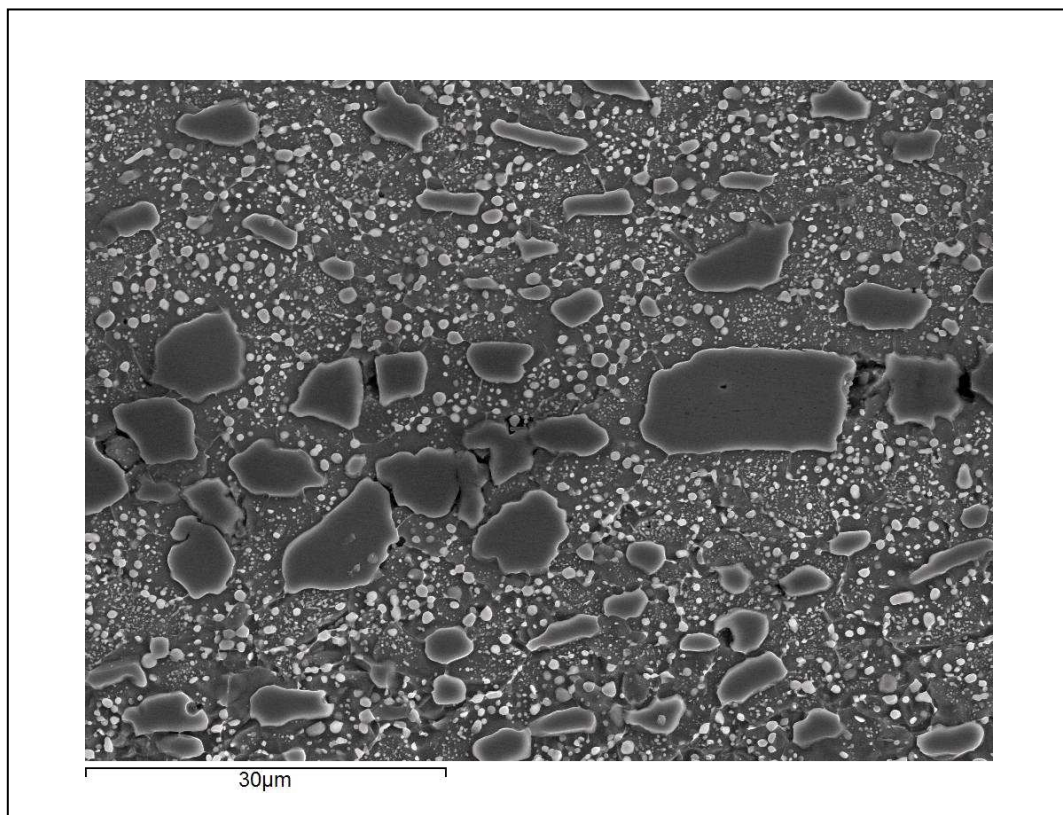


Figura.161: Detalle de la estructura de la figura 160. Se observa claramente la diferencia de tamaños de los cristales de cementita según su origen proeutectoide o eutectoide.

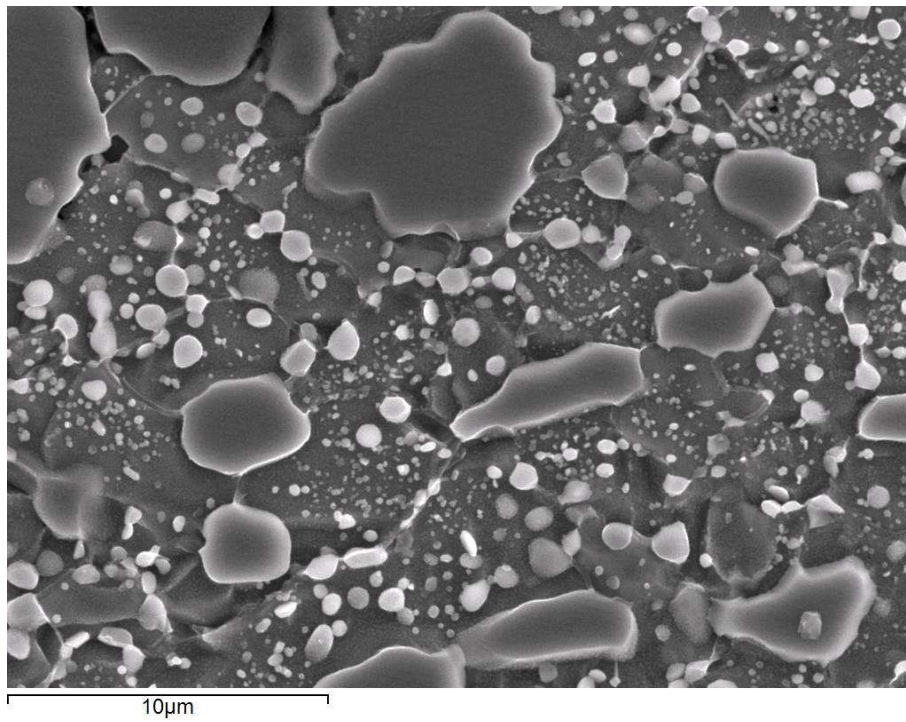


Figura.162: Detalle de la estructura de la figura 161.

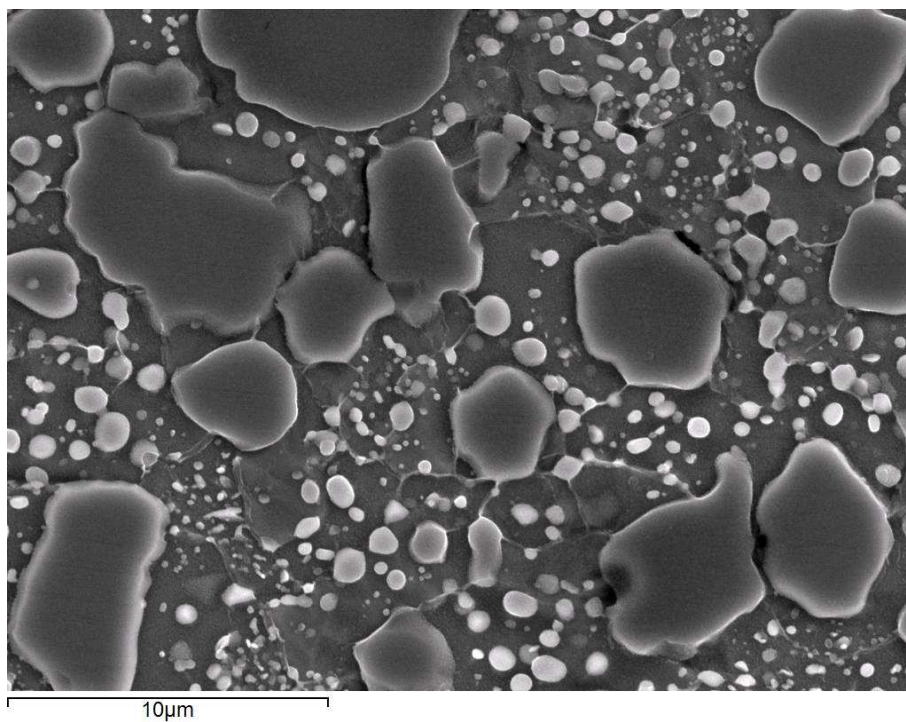


Figura.163: Otro detalle más de la estructura de las figuras 160 a 162. Obsérvese la globulización de los cristales de cementita proeutectoide y eutectoide.

IV. 5.- Operación de temple.

No todas las armas de acero de Damasco se templaban. Hay que considerar que el ataque químico oxidante ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) en una estructura martensítica la engrisa totalmente, ya que la matriz no es ferrítica. Por tanto, sólo se realizaba el temple si se deseaba aumentar la resistencia del acero. La resistencia al desgaste, del filo, es la misma esté templada o no el arma. Hay que tener en cuenta que la cementita es el constituyente más duro en los aceros al carbono.

La operación de temple debe hacerse desde la misma temperatura de recocido subcrítico de ablandamiento, para no regenerar la cementita proeutectoide continua. Ésto fragilizaría seriamente el acero. A esa temperatura de calentamiento sólo se disuelve, en la austenita, la cementita del eutectoide y un pequeño porcentaje de la cementita proeutectoide. Al templar en agua o en aceite, la matriz se transformará a martensita; quedando los cristales de cementita proeutectoides embebidos en ella. La severidad del temple puede hacer que el arma se agriete durante la operación debido a los cambios de volumen que se producen en dicha operación. Estas dilataciones causadas por el cambio de volumen pueden ser muy brusca y producir un agrietamiento. Debido al contenido en carbono en la austenita durante el recocido subcrítico, la velocidad de temple es suficiente para un temple en aceite; como se refleja en las crónicas ya relatadas en la Introducción. Como puede suceder que, parte de la cementita proeutectoide, se disuelva durante el recocido subcrítico, el contenido en carbono en la austenita sube por encima del 0.8% en masa. Esto puede acarrear que no temple toda la austenita y la matriz resultante sea de martensita con austenita retenida. Este hecho es favorable, ya que la austenita retenida proporciona tenacidad al arma. En el caso en que el acero quede muy duro, deberá revenirse a 350°C, para ganar tenacidad, como relata la crónica del cónsul británico en Alepo^[119] en el año 1824 (Figuras. 157 a 162). La dureza más aceptable debe estar entre 53 y 58 HRC.

Debido a la dificultad de realizar un ataque químico, que resalte claramente la martensita, frente a la cementita proeutectoide y a la posible existencia de austenita retenida; se ha diseñado un nuevo tipo de ataque metalográfico^[129]. Este nuevo tipo de ataque metalográfico consiste en dos etapas:

- a.- ataque químico oxidante de grabado (Nital al 4% o FeCl_3 en solución alcohólica acidificada con HCl).
- b.- teñido con azul de ftalocianina disuelto en laca Zapón (resina nitrocelulósica en acetona).

Este nuevo tipo de ataque metalográfico sólo es apto para microscopía óptica.

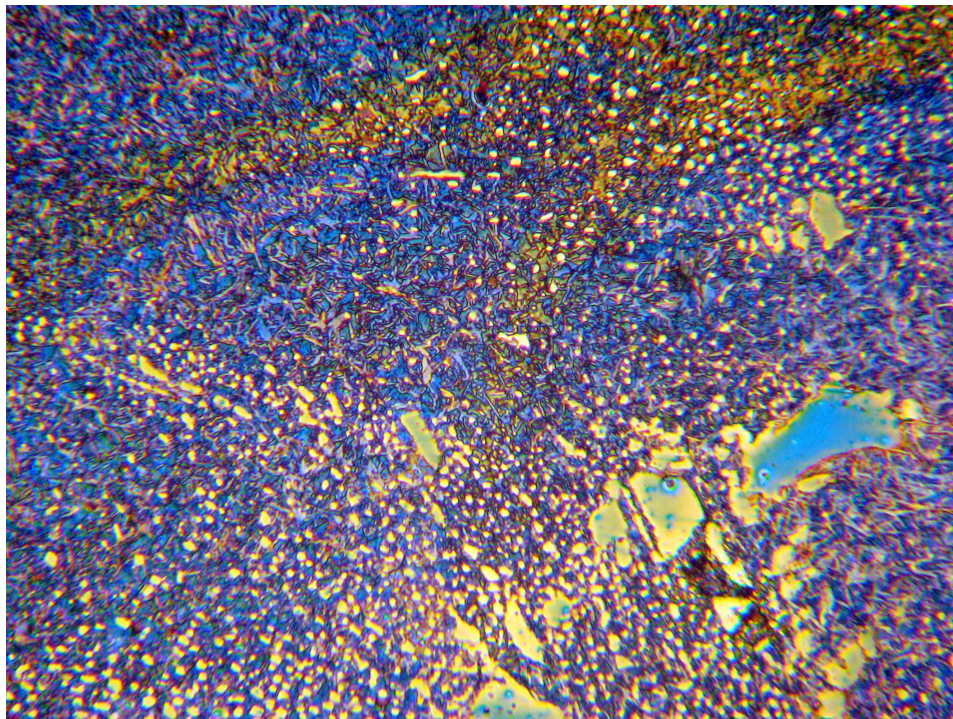


Figura.157: Ataque coloreado de un acero de Damasco forjado manual, recocido subcrítico a 760°C y templado en aceite. Se observan grandes cristales de cementita proeutectoide y otros más pequeños, de la misma fase, globulizados. La matriz azulada es de martensita con austenita retenida.

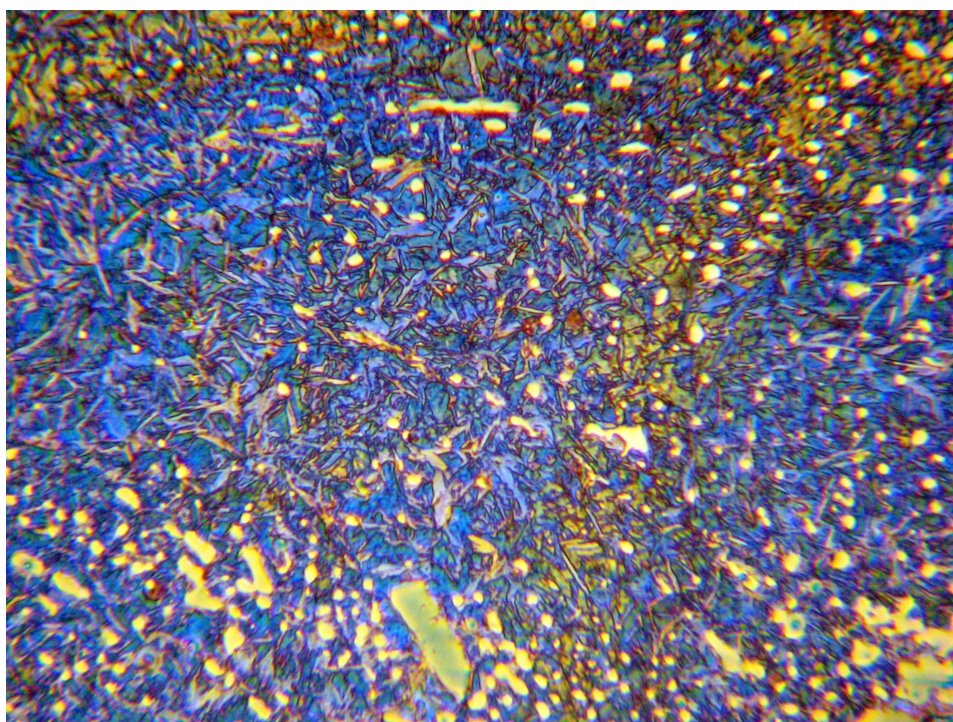


Figura.158: Detalle de la estructura de la figura.157, en el que se observa claramente la matriz de agujas de martenita y austenita retenida.

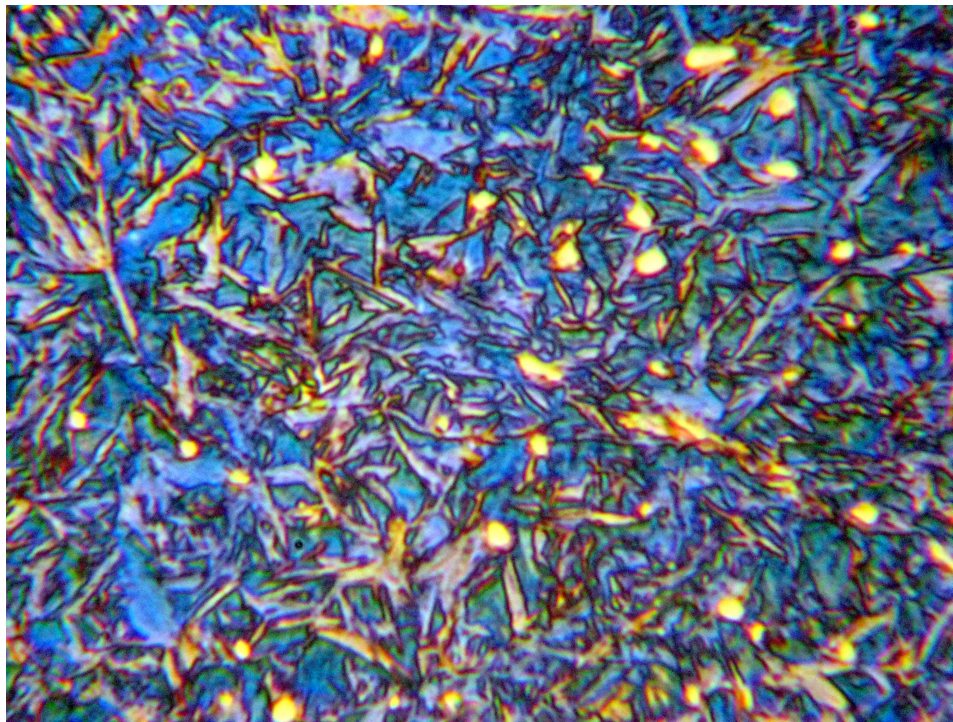


Figura.159: Detalle de la estructura de la figura.158, mostrando cristales pequeños de cementita proeutctoide globulizados en una matriz acicular de martensita en austenita retenida.

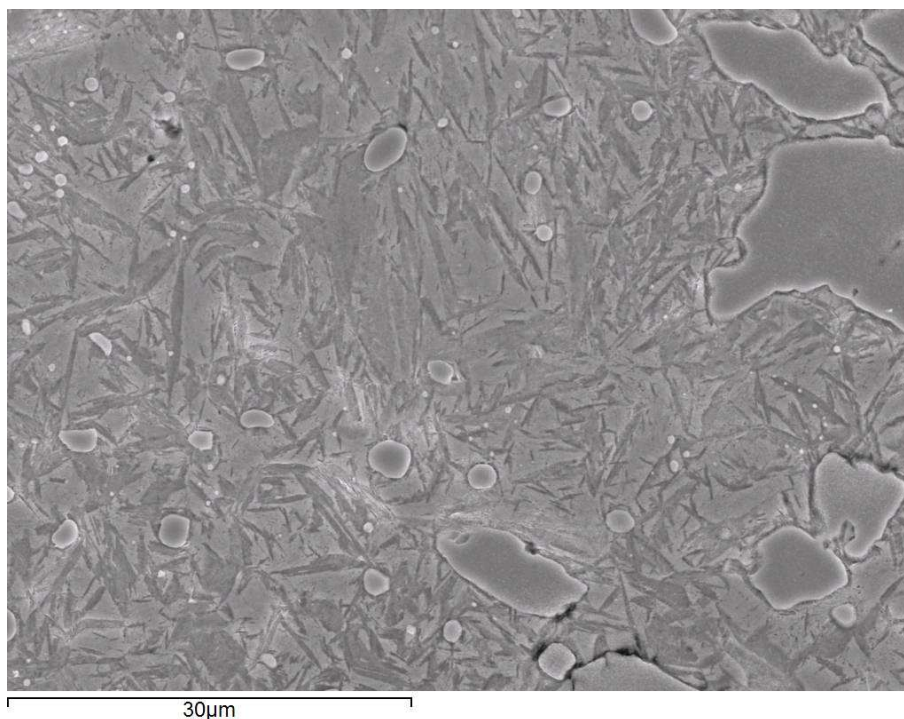


Figura.160: Micrografía obtenida mediante M.E.B., de la estructura de la figura.157. Se observan carburos de hierro en una matriz de martensita en austenita retenida.

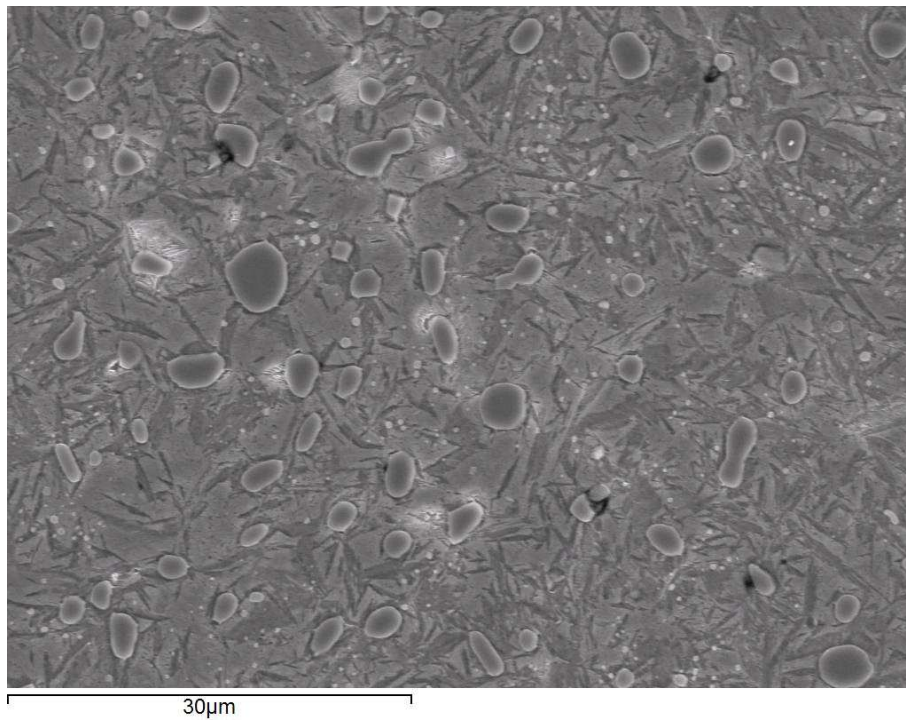


Figura.161: Detalle, mediante M.E.B., de la estructura de la figura.157. Se observan carburos de hierro globulizados en una matriz de martensita en austenita retenida.

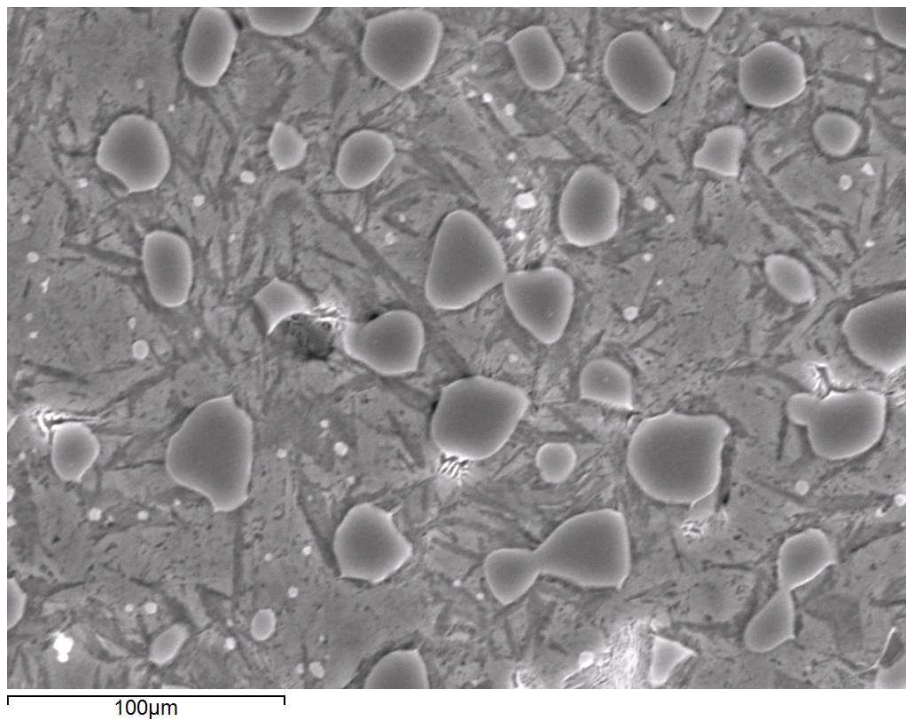


Figura.162: Otro detalle de la estructura de la figura.157, obtenido mediante M.E.B., en el que se observan carburos de hierro globulizados en una matriz de martensita en austenita retenida.

IV. 6.- Acicalado final: desbaste, pulido y ataque químico.

Aunque a primera vista parezca que el acicalado es una serie de operaciones de menor importancia que las anteriores: tratamientos térmicos, forja, temple, etc..., esto no es así.

El acicalamiento comprende las operaciones de enderezado, factura del filo y calibrado del arma, desbaste en piedra de agua (esmeril), pulido y ataque químico. Si la hoja de acero es para el arma de un personaje importante, hay que contar con los nihelados, la empuñadura de factura lujosa y la vaina y atalajes. Sin embargo, esto no entra dentro de los objetivos de esta tesis.

Las armas fabricadas durante la investigación han sido acicaladas por nosotros en el laboratorio, con la ayuda del taller mecánico de la Universidad Complutense de Madrid.

El desbaste y pulido se llevó a cabo de manera convencional, para muestras metálicas que han de ser observadas metalográficamente: discos abrasivos de desbaste en agua de Buheler de grano 240, 320, 600 y 2000,; y el pulido en alúmina α (0'3 μm) y alúmina γ (0'03 μm), en paño de pulir Buheler.

El ataque químico de las probetas y de las armas forjadas se llevó a cabo con Nital al 4% y con FeCl_3 en solución alcohólica ácida, obteniéndose unos resultados de la misma calidad que con las recetas medievales (Figuras.122, 123, 128, 138, 140).

V. DISCUSIÓN GENERAL

En esta investigación se reúnen dos campos fundamentales para resolver el enigma del acero de Damasco. Uno, es el campo de la investigación histórica y, el otro, la arqueológica y científica. La unión de ambos puntos de vista nos ha permitido resolver muchos de los enigmas de la fabricación de armas blancas con acero de Damasco.

La primera reivindicación que se deriva de esta tesis es el propio nombre del acero. Relacionado con Damasco ha servido para malinterpretarlo y asociarlo a otros tipos de acero soldados que no tienen nada que ver. Damasco se asocia a damasquino o damasquinado, en la actualidad, para la inmensa mayoría en nuestro mundo occidental. Por lo tanto, con ese nombre, sólo se refleja su aspecto estético puesto de manifiesto por las bandas serpenteantes de carburos. Y esto es un grave error, y motivo de confusión con otros aceros, ya que sabemos, que muchas armas fabricadas con este tipo de acero, no presentaban esas marcas. Y no eran la excepción, más bien, los aceros de Damasco sin marcas han supuesto la mayoría. En el caso de los templados, estas marcas son imposibles de resaltar. Sólo los aceros de Damasco medievales y modernos, procedentes de Persia (Isfahân) y sus zonas de influencia, presentaban ese aspecto estético tan atractivo.

Todos los shamshires y sables expuestos en los distintos museos y colecciones privadas, que presentan esa estética proceden de esos talleres y de esa época. Hay que, por tanto, tratar de volver a su nombre árabe original, o asimilado a otras lenguas, para identificar de forma clara y sin dudas al acero de Damasco.

Su nombre genuino es acero indio (indian steel), *al-hindi*, que asimilado al castellano es el de *alinde* o *alfinde*. Este nombre no permite confusiones con otros aceros que presenten damasquinados. Es un nombre más genérico que no sólo se refiere a los Damascos que presentan marcas sino, también, a los que no las presentan o no son visibles o están pulidos, o bien, están templados. Los científicos anglosajones comienzan ya a referirse a este acero con sus nombres definitorios como: indian steel o crucible steel. En castellano, existe una bella palabra que define a este acero claramente: *alinde* o *alfinde*. Vocablo romance derivado del al-hindi, como le denominaban los musulmanes andalusíes.

De nuestra investigación histórica se deriva que, el acero de Damasco se limitó, en épocas medieval y moderna, geográficamente a los territorios del imperio islámico. Y, aunque la cuna de este acero y su tecnología de fabricación parecen ligados a la India, Persia y el Irak, no es menos verdad que alcanzó un gran desarrollo en otros extremos geográficos del mundo islámico, como Al Andalus. Este territorio musulmán, el más occidental de todos, conoció el desarrollo de esta tecnología, que muy posiblemente, fue traída hasta Al Andalus por el emir cordobés Abderrahmán II (792-852). Este emir quiso engrandecer su reino desde todos los ángulos: económico, social, cultural, tecnológico, etc. Para ello trajo del Irak y de Persia todo cuanto pudo y, cómo no, expertos fabricantes de armas de acero ^[130-134].

Si el acero de Damasco ganó su prestigio como material de extraordinarias propiedades mecánicas, como su dureza, resistencia mecánica y filo cortante para la

fabricación de armas y útiles, aunque también, su brillo especular tras el pulido le convirtió en magníficos espejos. Desde hace unas décadas, parece que su estética de marcas superficiales muy bellas y visibles ha enmascarado su eficacia militar e industrial. Es curioso que ningún cronista musulmán andalusí o castellano-leonés medieval haga referencia a estas marcas superficiales. Igualmente, sabios de la categoría de al-Biruni o al-Kindi, tampoco hacen referencia a este hecho y sí a la calidad de las armas forjadas con él. En la actualidad, se coleccionan las armas de acero de Damasco por sus marcas superficiales, la geometría del arma y la belleza de su empuñadura y son, estos atributos, los que hacen que estén más o menos valorados en los mejores museos y las más exquisitas colecciones del mundo. Es injusto, ya que si algo los hizo famosos y temibles, fueron sus características mecánicas en el combate.

En esta investigación no hemos caído en la trampa de la estética, que es lo único que persiguen, en las últimas décadas, los científicos. Hemos dado el máximo valor a sus características mecánicas, pero nos hemos introducido en el arte de conseguir bellas marcas superficiales. Nadie más cualificado que los maestros herreros persas para conseguir armas eficaces y que presenten las bellas aguas sinuosas superficiales. Y dentro de estos maestros armeros, nadie más señalado que los de los talleres de Isfahân, en Persia. La firma más valorada, el cuño de herrero más prestigioso es el de Assad Allâh al-Isfahânî. En él nos hemos basado, para nuestra investigación en este tema, y nos ha servido para aclarar todos aquellos secretos necesarios para, además de forjar el arma eficaz, conseguir una belleza insuperable.

Para poder observar las marcas superficiales, éstas deben de cumplir unos requisitos ópticos que hemos valorado desde el punto de vista de la agudeza visual y la óptica física. Deben cumplir con el requisito de presentar unos espesores y espaciados entre las bandas, mínimos para ser visibles. Para ello es necesario partir de un acero (lingote wootz) hipercarburado, con la mayor proporción posible de carburo de hierro en espacios interdendríticos (ledeburítico), o límites de grano austeníticos, para conseguir volumen visible, a simple vista, en los cristales fragmentados por la forja, y tamaño de grano austenítico, o separación interdendrítica grosera, para poder permitir una separación suficiente para ser visibles, las bandas de los carburos de hierro.

Es un hecho, que ninguno de los científicos estudiosos del tema, hayan conseguido este efecto y sí la forja de estos aceros. La causa de esto es que siempre parten de un acero hipereutectoide fabricado directamente en crisol, en el que la cementita proeutectoide causante, de las futuras bandas de carburos, se sitúa en los límites de grano de la austenita y, aunque realizan un recocido a alta temperatura y un enfriamiento lento para conseguir granos grandes y, por tanto, separaciones importantes entre estos límites de grano de cementita proeutectoide, el grosor de esta cementita se hace muy delgado, lo que da lugar por forja a cristales de tamaño muy fino, globulizados, que quedan disimulados con los de la cementita eutectoide. El resultado son cristales finos y muy difuminados, lo que hace que haya publicado y dicho en conferencias O. D. Sherby^[42-46]: *“hemos obtenido acero de Damasco por forja pero no se parece a los fabricados en Persia”*.

Una clave importante de este fracaso está en no haber recurrido a las crónicas medievales y modernas en las que queda claro un hecho evidente; los armeros musulmanes no podían obtener por reducción, fusión y colada aceros hipereutectoides del 1'4 al 1'8% de carbono en masa. Sólo llegaban a estos aceros mediante

carburización con materiales cementantes, a altas temperaturas, en crisol cerrado. Este es el hecho por el que se le ha conocido también, desde antiguo, como acero al crisol. El resultado es cementita ledeburítica masiva de gran tamaño en espacios interdendríticos; conseguida en calentamientos prolongados, a altas temperaturas (1270°C-1350°C), con dendritas de gran tamaño y, por ello, de gran separación interdendrítica. La forja produce grandes cristales de cementita proeutéctica, de tamaño muy superior a los cristales globulizados de cementita eutectoide, y en bandas separadas y visibles a simple vista.

Otra clave, que no fue desvelada en occidente, como se lamenta R.A.F. de Rèamur (apartado III.4, pág.106), es la imposibilidad de su forja en condiciones válidas de temperatura para aceros hipoeutectoides, eutectoides y ligeramente hipereutectoides. Aquí, los maestros armeros medievales musulmanes, se adelantaron en muchos siglos a occidente en la foja de aceros hipercarburados de herramientas. El primer inconveniente de un acero hipercarburado es que los límites de grano de la austenita original aparecen en forma de malla o red continua de cementita. La cementita es muy frágil en frío y a temperaturas del rojo amarillo y blanco y, además, esta red de cristales de cementita emerge a superficie. Un golpe de martillo medianamente enérgico provoca la aparición de una grieta frágil, o muchas grietas simultáneas, que rompen el acero como si fuera barro.

Los herreros musulmanes medievales y modernos sabían que era necesaria una preparación del lingote previa a su forja. Ellos globulizaban y segmentaban la cementita continua en límites de grano, mediante un tratamiento térmico idéntico al que se hace hoy día con los aceros de herramientas. Ellos le denominaban endulzar o ablandar el acero; nosotros le llamamos recocido subcrítico. Este tratamiento de calentamiento a temperaturas, en que se producía una parcial fragmentación y globulización de la cementita, se hacía a temperaturas muy ligeramente superiores a la eutectoide y, por supuesto, alejadas del campo de existencia en solitario de la austenita. Este calentamiento, idéntico al efectuado en la actualidad, se hacía con los lingotes, o trozos de acero indio, revestidos de arcilla refractaria para evitar su decarburación. En la actualidad el recocido subcrítico de aceros hipercarburados, aleados o no, se lleva a cabo en hornos de atmósfera controlada.

Con esta operación se conseguía segmentar, trocear y globulizar parcialmente la tupida red de cementita proeutectoide. A partir de aquí, se trataba, como en la actualidad con los aceros de herramientas, de forjar en caliente sin regenerar la temida red continua y fragilizante de cementita proeutectoide. Esto se logra no superando temperaturas de forja por encima de los (760-780)°C. Evitando siempre llegar en el calentamiento al campo de la austenita, lo que regeneraría la frágil red de cementita proeutectoide y provocaría en el golpeo de la forja la ruina del arma. Este era el secreto que volvió loco a occidente hasta principios del siglo XX. Del desconocimiento de este secreto, hoy día tan evidente, se deriva el lamento del gran científico francés R.A.F. de Rèamur (apartado III.4, pág.106).

Si todo se ha seguido con la receta de los antiguos armeros musulmanes y con la colaboración de un maestro armero de calidad, habremos logrado forjar un arma espléndida en acero de Damasco. Si, además, se cuidó durante el proceso de carburización, de obtener dendritas de gran tamaño, por lo tanto, cementita ledeburítica muy grosera, y grandes distancias entre estas formaciones cristalinas, el resultado final

serán unas bellas marcas en forma de bandas, más o menos serpenteantes, dependiendo del arte de la mano del maestro armero. Los dibujos obtenidos pueden ser muy variados, pero siempre, espléndidos e inquietantes ^[19,20].

El arte siempre ha tenido entre sus metas la luz y la oscuridad, lo claro y lo oscuro, el blanco y el negro. Gran parte de la belleza de una imagen está en el contraste de luz y sombra. Los maestros armeros persas persiguieron este hecho en sus espadas; esta imagen inquietante de la luz y la oscuridad en forma de bandas mágicas y serpenteantes, escalera de Mahoma, rosetones, etc.

Dibujar y pintar con el martillo en un poderoso acero, geometrías bellísimas, es un arte de iniciados en la metalurgia de siempre. Muchos artistas han elegido esta secuencia de líneas claras y oscuras para construir formas increíbles. Un ejemplo muy representativo en el arte, es la obra del artista alemán M. C. Escher, a caballo entre el siglo XIX y el XX, al igual que con el fuerte acero lo fue, en época medieval, el maestro herrero Assad Allâh al Isfahânî.

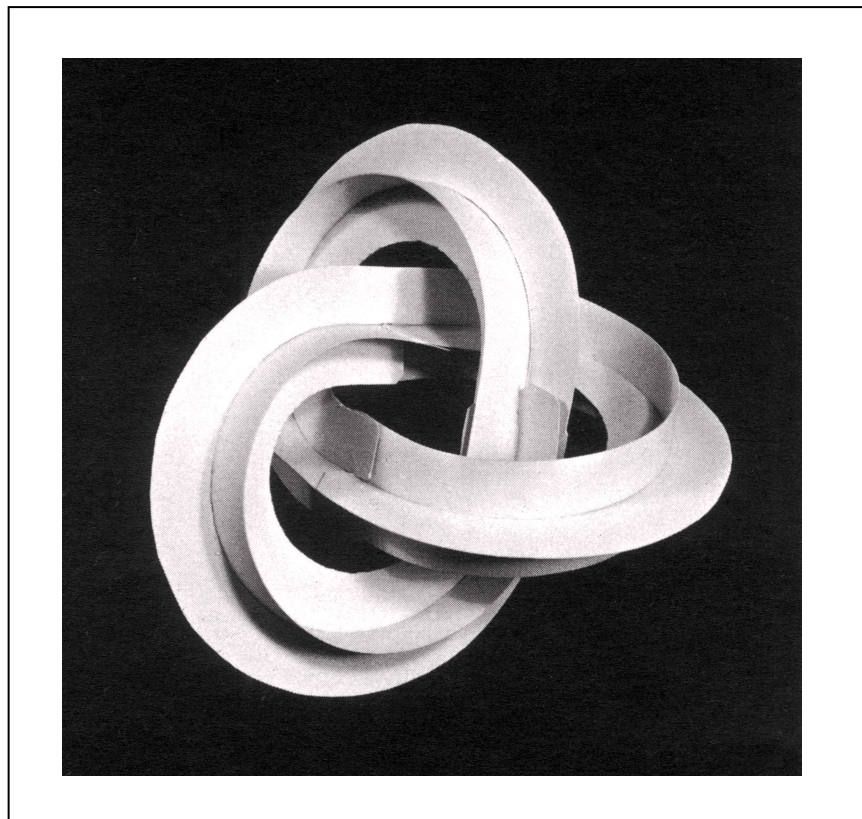


Figura.158: Modelo de cartón para los nudos (M.C. Escher).



Figura.159: Tres mundos, Litografía, 1955, (M.C. Escher)

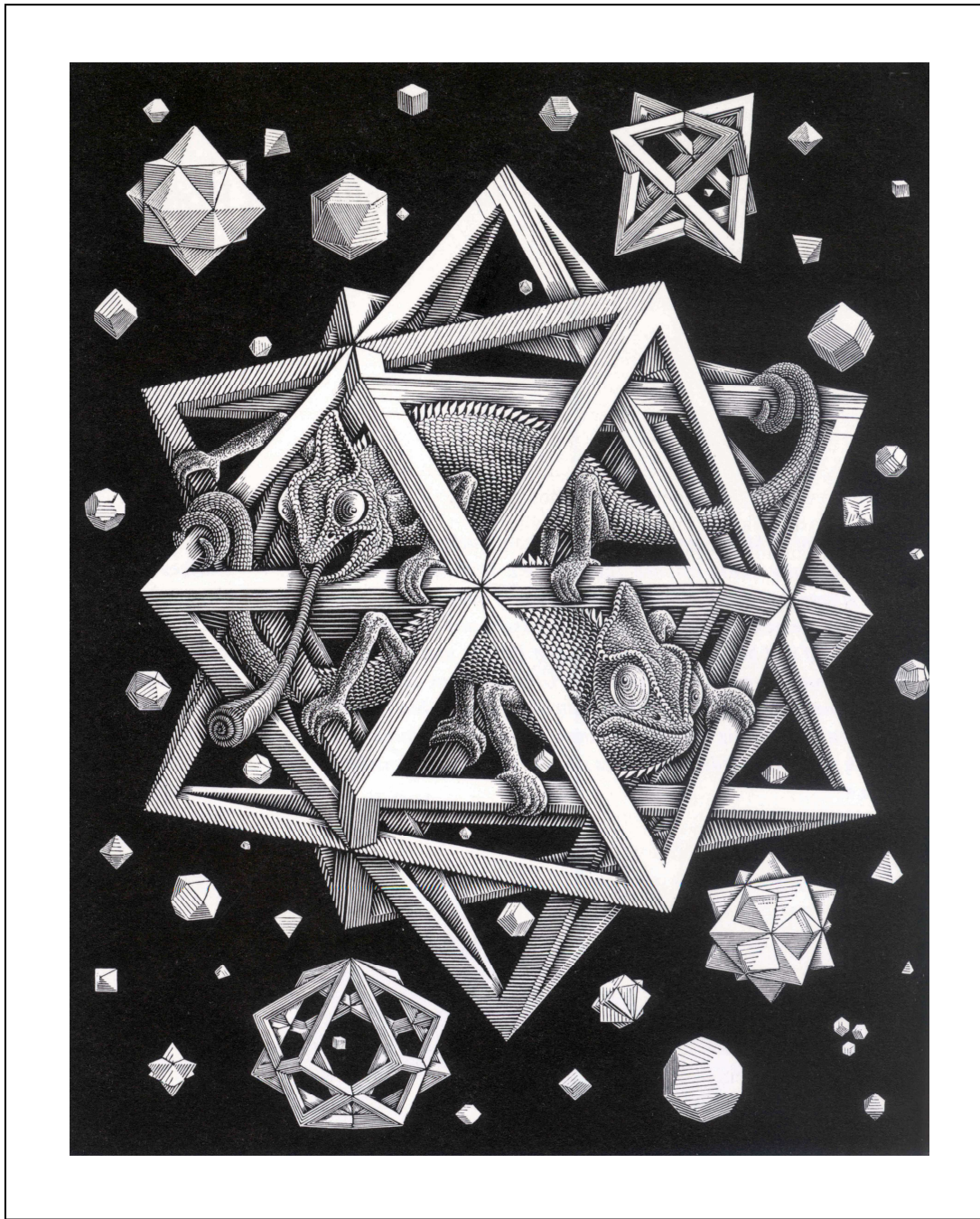


Figura.160: Estrellas. Grabado en madera, 1948, (M.C. Escher)



Figura.161: Sueño. Grabado en madera, 1935, (M.C. Escher)

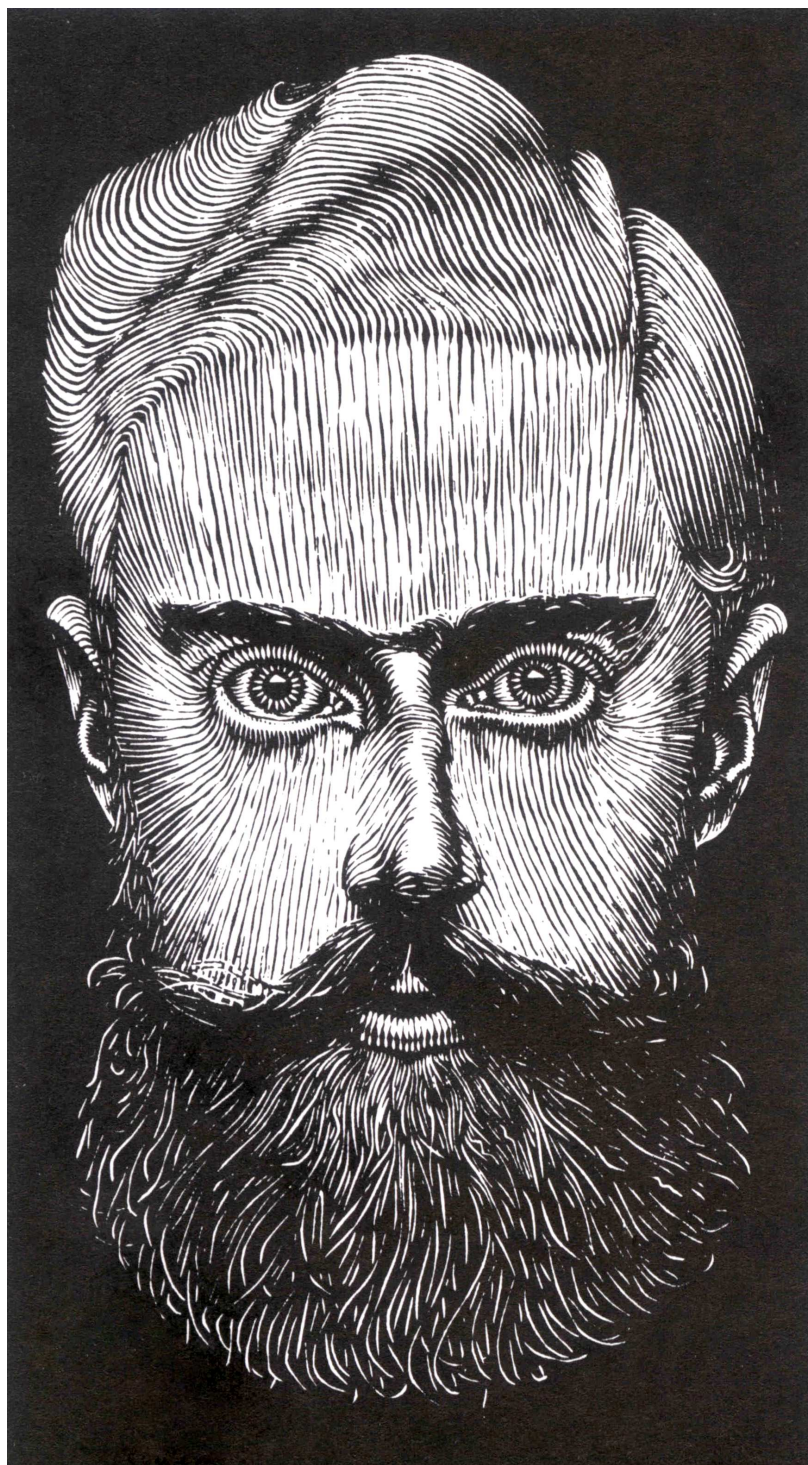


Figura.162: Autorretrato. Grabado en madera, 1923, (M.C. Escher)

Forjada el arma queda con una resistencia mecánica notable de 110-120 kg/mm² (1100-1200 MPa) y una dureza de alrededor de 35 HRC. Su resistencia al desgaste en el filo es muy elevada debido a la presencia de gran cantidad de cristales de cementita proeutectoide y eutectoide. La tenacidad es excelente, a causa de la intensa globulización sufrida durante la forja en caliente, y a que la matriz es ferrítica. En este estado de forja, sin tratamientos térmicos posteriores, se desbasta y se pule el arma, y se pasa al ataque químico oxidante. El resultado es un arma contundente y muy bella, debido a las marcas superficiales en forma de bandas alternadas oscuras y claras. En este estado, se encuentran todas las armas persas que existen en los museos y colecciones y que han podido ser estudiadas. Debemos insistir en que las espadas de acero de Damasco, con marcas superficiales, son las más atractivas para coleccionistas y museos. Sin embargo, se fabricaron muchísimas más sin estas marcas superficiales, bien porque durante su fabricación no se supo, o no se pudo, reproducir las marcas superficiales de forma visible o, más sencillo, fueron templadas para ganar más dureza y resistencia.

Para templar estas armas forjadas con acero de Damasco deben tenerse en cuenta algunas consideraciones muy específicas de estos aceros hipereutectoides de ultraalto contenido en carbono. La primera de ellas es que, para templar, debe procederse antes a un recocido subcrítico durante el que no se disolverá en la austenita los cristales de cementita proeutectoide o primaria. Sólo se disolverá la cementita eutectoide, por lo que quedará una austenita con un contenido en carbono de alrededor del 0,8% en masa del eutectoide. Si se eleva la temperatura por encima de 760°C-780°C, o se llega al campo austenítico, se disuelve toda o casi toda la cementita, incluida la proeutectoide, con lo que la austenita llegaría a contenidos en carbono muy elevados, lo que provocaría que templase mal y poco porcentaje de ella, y que desaparecieran los cristales de cementita proeutectoide, que son los que proporcionan al filo del arma su elevada resistencia al desgaste. El resultado sería arruinar el arma.

La segunda consideración, después del recocido subcrítico, es la elección del baño de temple: agua con sal muera, agua o aceite. La severidad del temple descende del agua con sal muera al baño de aceite. El temple en agua, con sal muera o sin ella, es demasiado severo; ya que el contenido en carbono de la austenita es muy elevado, de alrededor del 0,8% en masa, y la sección de estas armas es muy pequeña. El resultado es un temple muy duro, que puede producir, durante los cambios de volumen del acero, durante la transformación martensítica, la aparición de grietas que arruinarían el arma.

Si recurrimos a las recetas estudiadas, en las crónicas, podemos comprobar cómo en los aceros en que se describe el temple minuciosamente, éste se realiza en aceite vegetal o mineral. Así, como ya referimos en la Introducción (apartado I.2, página 69), M. Baker, Cónsul General Británico en Alepo (Siria), con motivo de la restauración de dos sables de acero de Damasco deteriorados, cuenta cómo la pila, donde se procede a realizar el temple, está llena de un líquido cuyos componentes, son: aceite de sésamo, sebo de carnero, cera virgen y nafta, o también, poso de betún (aceite mineral); ya que la nafta era muy cara.

El temple en aceite es, por lo tanto, el más adecuado; consiguiéndose una matriz de martenita en austenita retenida en la que aparecen dispersos los carburos de hierro proeutectoides. De esta manera no se hace necesario el revenido, ya que la austenita le

proporciona una buena tenacidad. La resistencia puede aumentar hasta (190-200) kg/mm² (1900-2000 MPa) y su dureza quedar entre los 55 y los 58 HRC.

Mayores durezas y resistencia proporcionarían fragilidad al arma. De nuevo, en el caso del temple de los aceros de Damasco, se realiza en las mismas condiciones de los aceros actuales hipercarburados de herramientas: recocido subcrítico y temple en agua o aceite, dependiendo de la sección de la pieza.

La microestructura de temple, de los aceros de Damasco, se visualiza, en microscopía óptica, con cierta dificultad, por lo que se decidió poner a punto un tipo de ataque químico que revelara correctamente dicha microestructura. Se consiguieron resultados satisfactorios con una preparación combinada de, un ataque químico oxidante convencional, seguido de la deposición de un film (película) muy fina de un colorante, como el azul de ftalocianina. Esta película se deposita mediante pincel, algodón, etc, impregnado en una solución de azul de ftalocianina disuelta en laca zapón (resina nitrocelulósica en acetona). Este tipo de preparación ha sido muy exitosa no sólo con las estructuras de temple de los aceros de Damasco, sino con todas aquellas estructuras difíciles de visualizar en aceros y fundiciones templados y sometidos a enfriamientos isotérmicos (Figuras. 163-166).

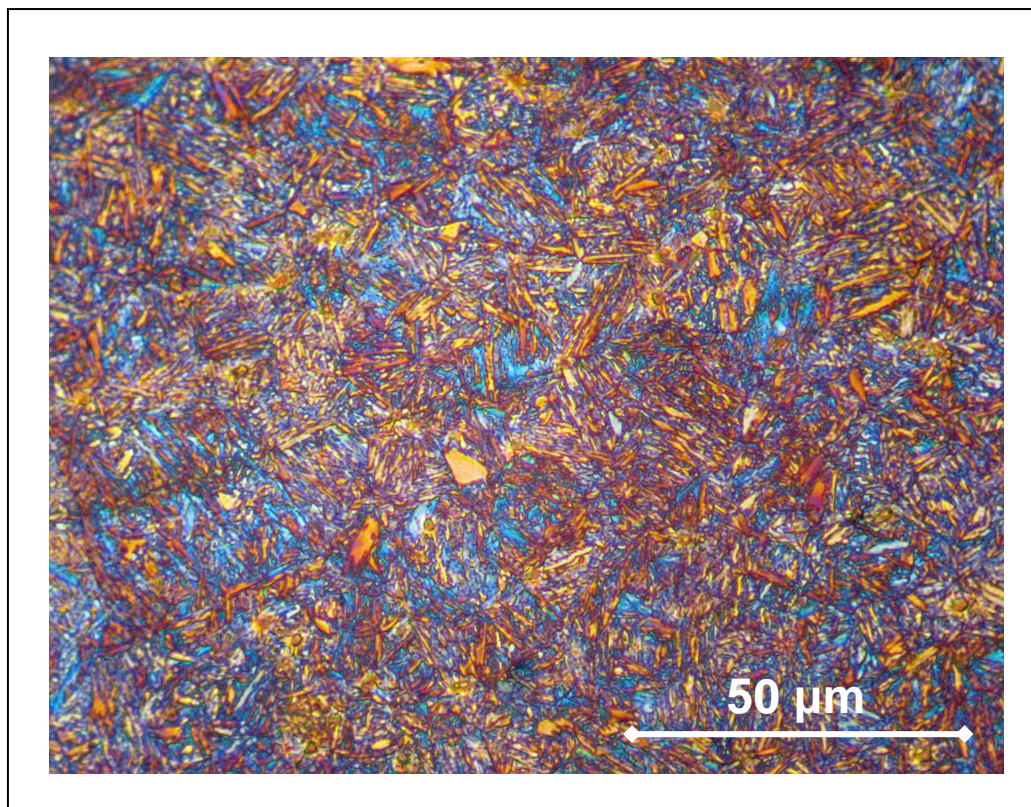


Figura.163: Estructura martensítica de un acero hipoeutectoide templado en agua, obtenida mediante microscopía óptica con preparación metalográfica de color.

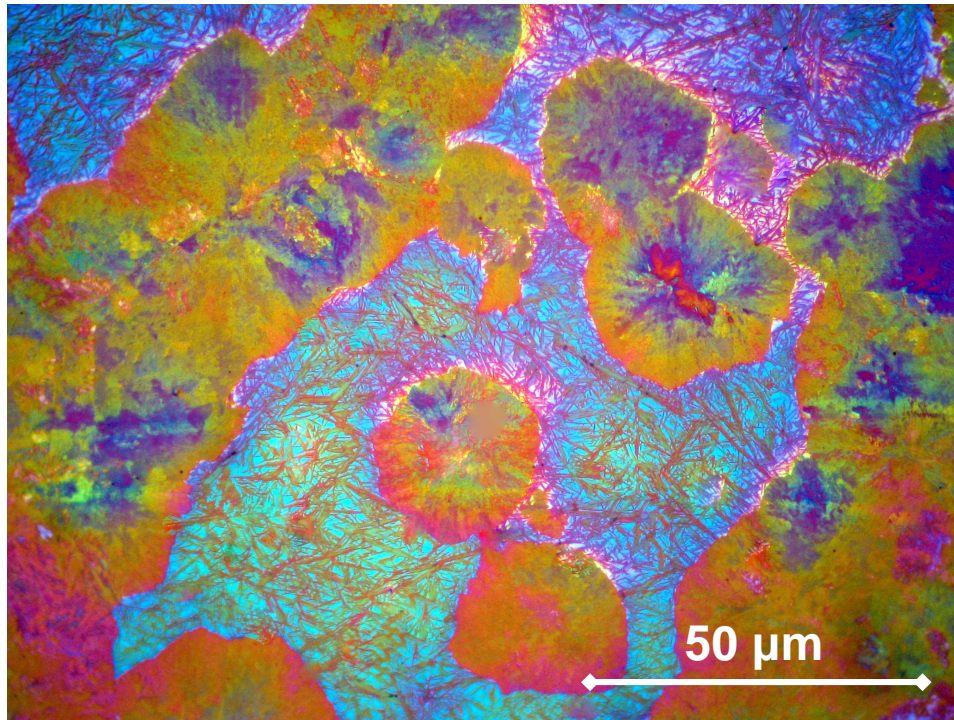


Figura.164: Estructura de nódulos de perlita fina en una matriz de martensita en austenita retenida de un acero hipereutectoide con un 1% de wolframio en masa, obtenida mediante microscopia óptica con preparación metalográfica de color.

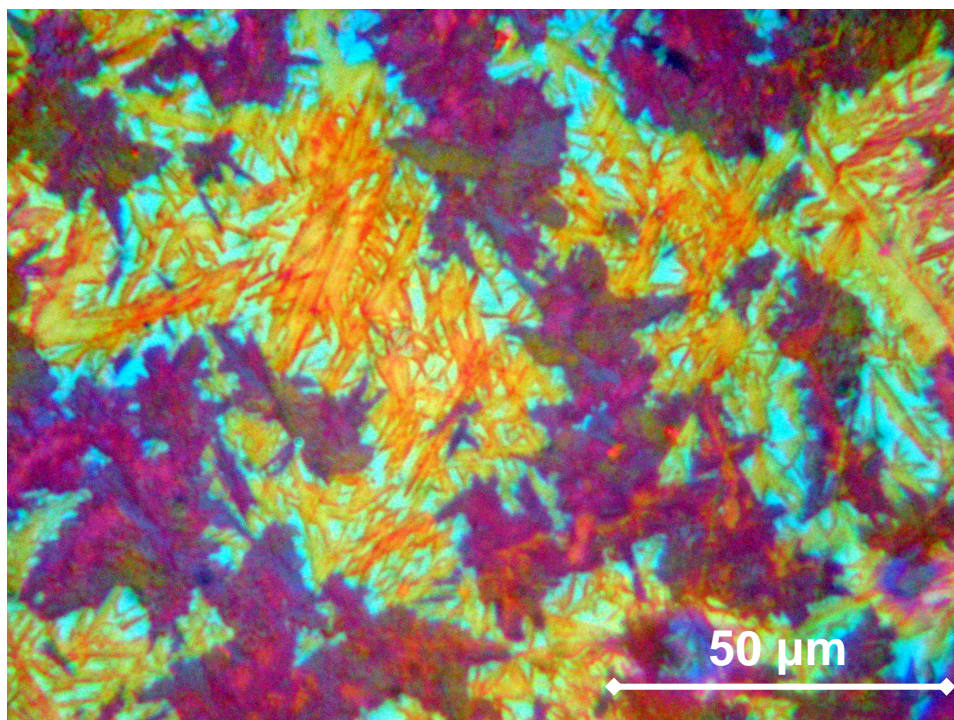


Figura.165: Estructura de bainita superior en una matriz de martensita en austenita retenida de un acero hipereutectoide, obtenida mediante microscopia óptica con preparación metalográfica de color.

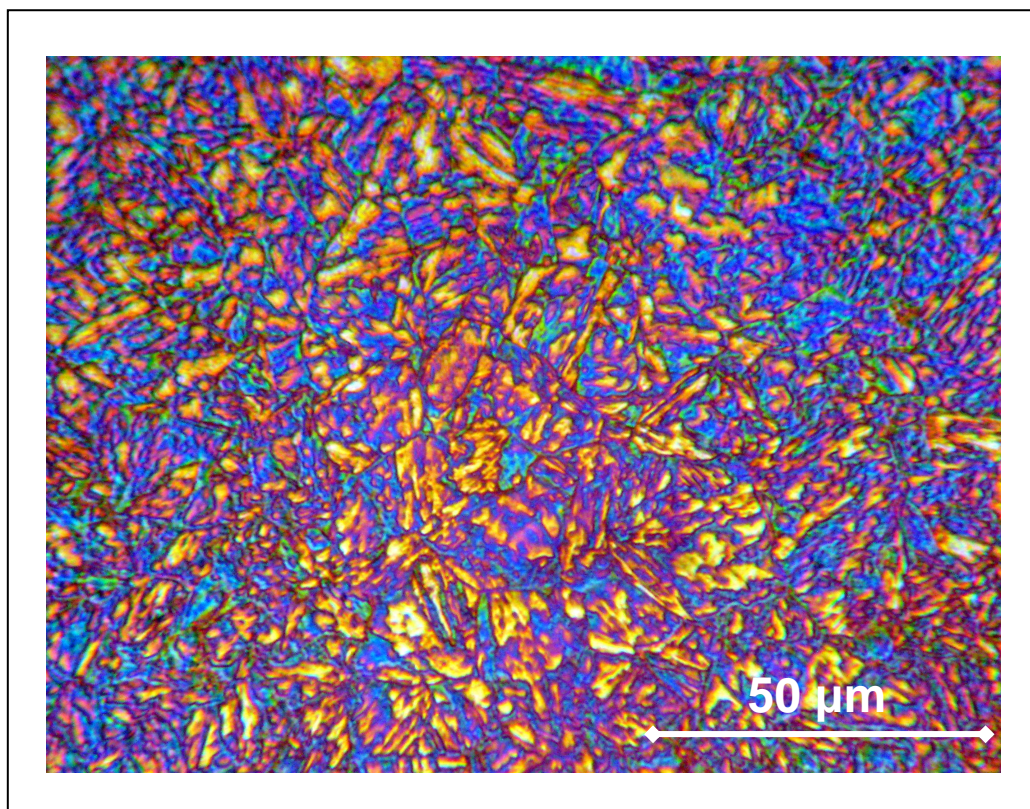


Figura.166: Estructura de martensita envejecida en un acero Maraging 250, obtenida mediante microscopia óptica con preparación metalográfica de color.

En los casos de los aceros de Damasco con marcas superficiales muy pequeñas no visibles o templados, el acicalado final es el desbaste y el pulido a espejo. Cuando no sean estos el caso, sino que se trate de un acero de Damasco forjado que presenta marcas superficiales, el acicalado final será el desbaste y pulido a espejo, seguido de un ataque químico oxidante, simultáneo en toda la pieza, para que no aparezcan manchas o zonas heterogéneas de color. El ataque químico que se propone, en las distintas recetas medievales musulmanas y europeas, presentan un denominador común, el uso de sales ferríticas en soluciones acidificadas, en las que se aprovecha la reacción: $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$. En el caso de aceros de Damasco forjados con marcas superficiales, el ataque provoca la disolución de la ferrita y deja inalterados los cristales de cementita. Por efecto óptico de la luz, las partículas de cementita reflejan la luz incidente y se ven claras y brillantes, mientras que la ferrita queda en la penumbra presentando un color mate oscuro. Este es el efecto mágico de los aceros de Damasco con marcas superficiales, como los magníficos shamshires persas medievales y modernos, en especial los del taller de Assad Allâh al-Isfahânî.

Para resumir brevemente cuáles son las claves fundamentales a tener en cuenta para obtener un acero de Damasco con marcas superficiales, hay que cuidarse de tres etapas fundamentales:

- A.- Obtener un acero ledeburítico y enfriamiento al aire.
- B.- Hacer un recocido subcrítico, previo a la forja, sin decarburación (760°).
- C.- Forja en caliente sin superar nunca los 760°C.

La etapa A es crucial para obtener marcas superficiales visibles y, éstas lo son, si los cristales de cementita proeutectoide son suficientemente groseros y, su separación en bandas sobrepasa, suficientemente, las distancias mínimas que exige la agudeza visual del ojo humano. Si el acero se obtiene por carburización a alta temperatura, entre 1270°C y 1350°C, se llega a una estructura formada por dos fases: una sólida y otra líquida. La sólida es austenita empobrecida en carbono ($\%C \ll 2\%$ en masa), con morfología dendrítica y, la fase líquida, en los espacios interdendríticos, con un elevado contenido en carbono ($\%C \gg 2\%$ en masa), como señala su línea de solvus. El porcentaje de austenita en ese instante, es de alrededor de un 50% en volumen del total, el resto es la fase líquida. Si desde ese estado, se produce un enfriamiento al aire, la solidificación se produce muy rápidamente, con lo que no hay posibilidad de homogenización entre ambas fases: sólida (austenita) y líquida, debido al intervalo de solidificación y a la inclinación de las líneas de solvus. Por lo tanto, el sólido resultante, cuando estamos en el campo austenítico, el porcentaje de esta fase es del 50% al 60% del volumen total, cuando, en condiciones de equilibrio, debería ser del 100% de la estructura. Cuando continua el enfriamiento, ya en estado sólido, la austenita empobrecida en carbono – composición en carbono próxima al eutectoide, cuando le correspondía, en situación de equilibrio, al 2% de carbono en masa- segrega el pequeño exceso de ese elemento, hacia el sólido interdendrítico, ledeburita; incluso bajando por debajo del 0.8% de carbono en masa, por efecto sumidero de este agregado eutéctico. Por debajo de la temperatura eutectoide, se produce la reacción eutectoide, dando perlita (ferrita + cementita). También sufre la reacción eutectoide, la austenita retenida en la ledeburita.

El resultado final, es una morfología aparente, en que la mayor parte del carbono se halla en las zonas ledeburíticas, mientras que, la matriz perlítica (austenita transformada), sólo ocupa un 60% del total que le hubiera correspondido en otras circunstancias de más equilibrio. Para entender mejor este efecto, obsérvese el siguiente diagrama de equilibrio^[112].

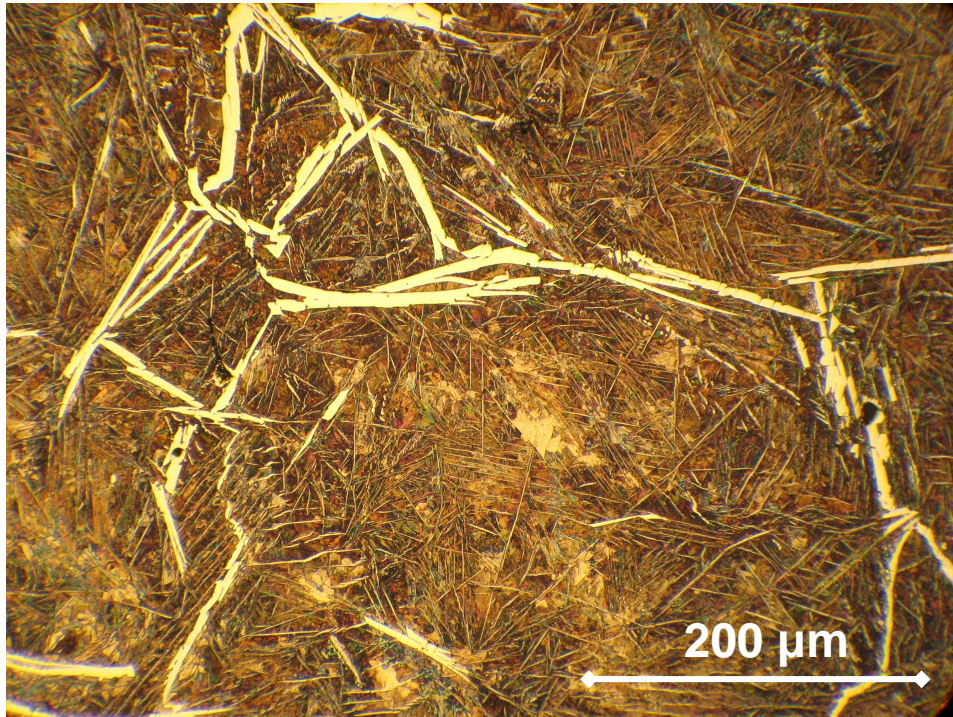


Figura.167: Estructura de colada de un acero hipercarburado (1'8% C en masa), obtenido por fusión en horno eléctrico y moldeado en lingotera. Se observan granos equiaxiales perlíticos entramados en una red o esponja de cementita proeutectoide. Se observan, además, agujas de cementita proeutectoide con estructura Widmanstätten.

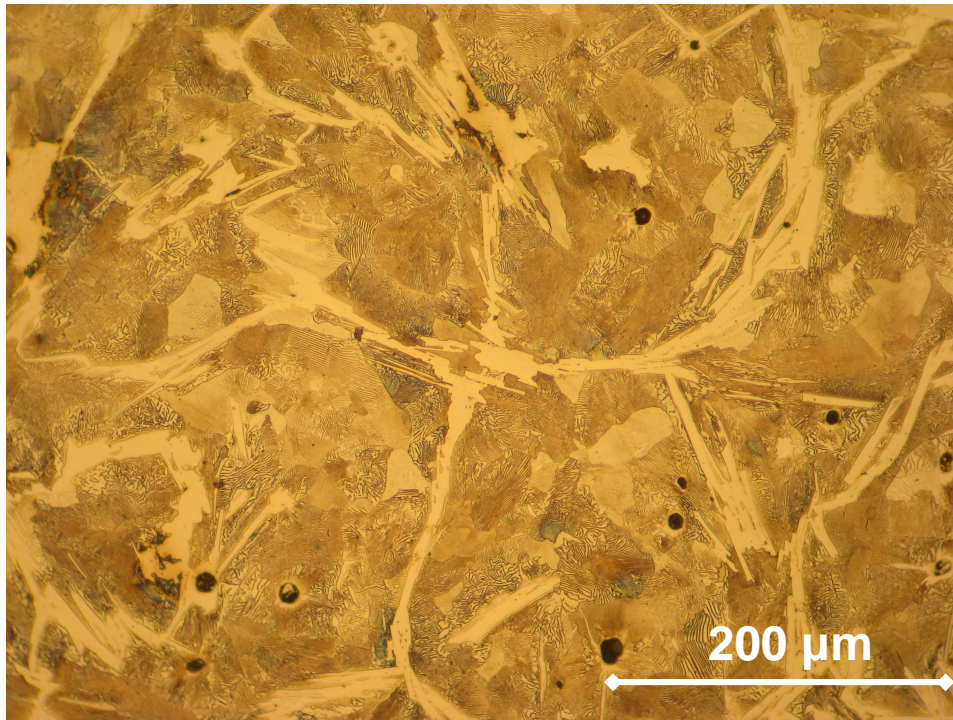


Figura.168: Estructura resultante del recocido a 1100°C y enfriamiento lento del acero de la figura.167. Nótese la ausencia total de cementita Widmanstätten proeutectoide. Este es el acero de partida para autores como: Pendray, Verhoeven, Sherby, etc.^[23-46]

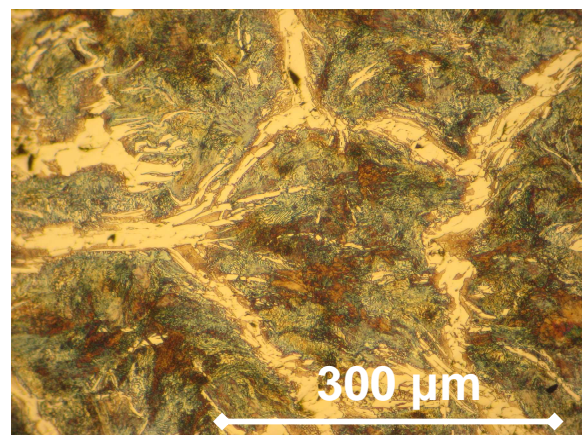
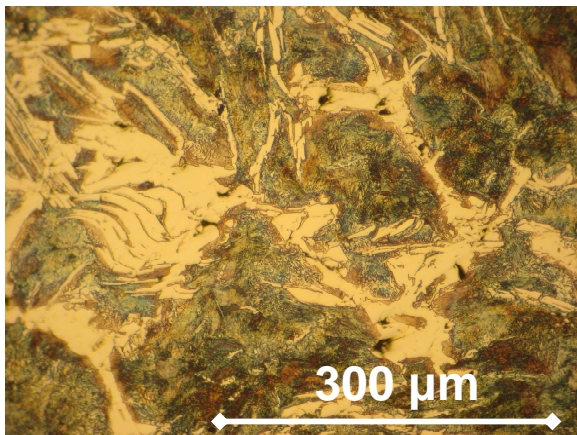


Figura.169: Estructura de un acero hipercarburado de igual composición que el de la figura.167, obtenido por carburización a 1270°C y enfriado al aire. Obsérvese el grosor de los cristales de cementita ledeburítica y su porcentaje frente a la matriz perlítica, frente a los aceros de las figuras.167 y 168.

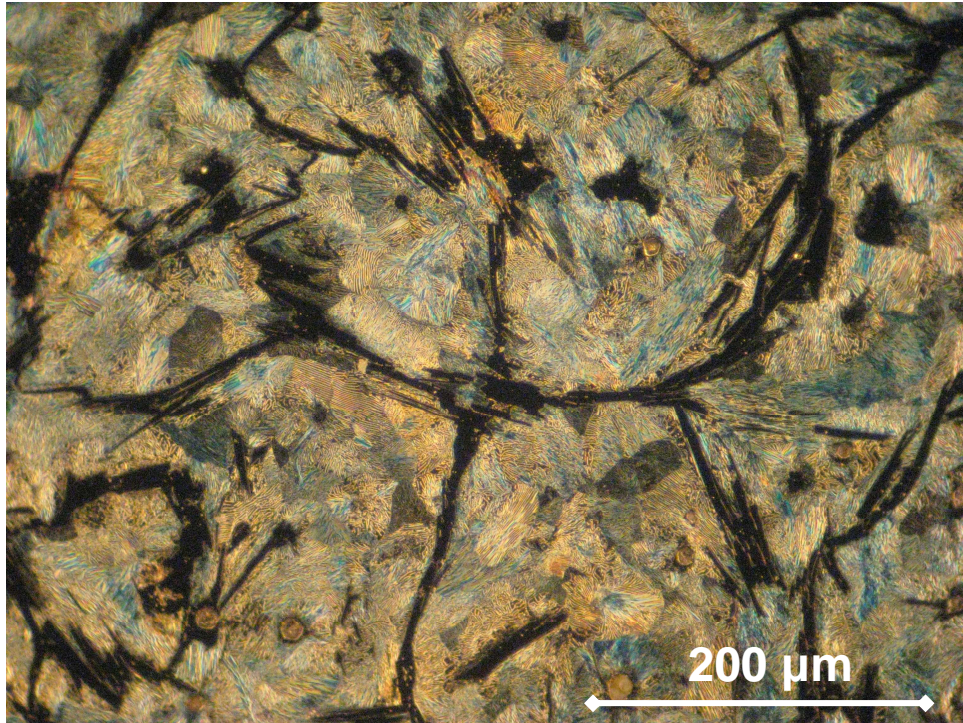


Figura.170: Se trata de la misma imagen de la figura.168 pero obtenida en campo oscuro. Se resalta en color oscuro, la malla de cementita proeutectoide, frente a la matriz perlítica.

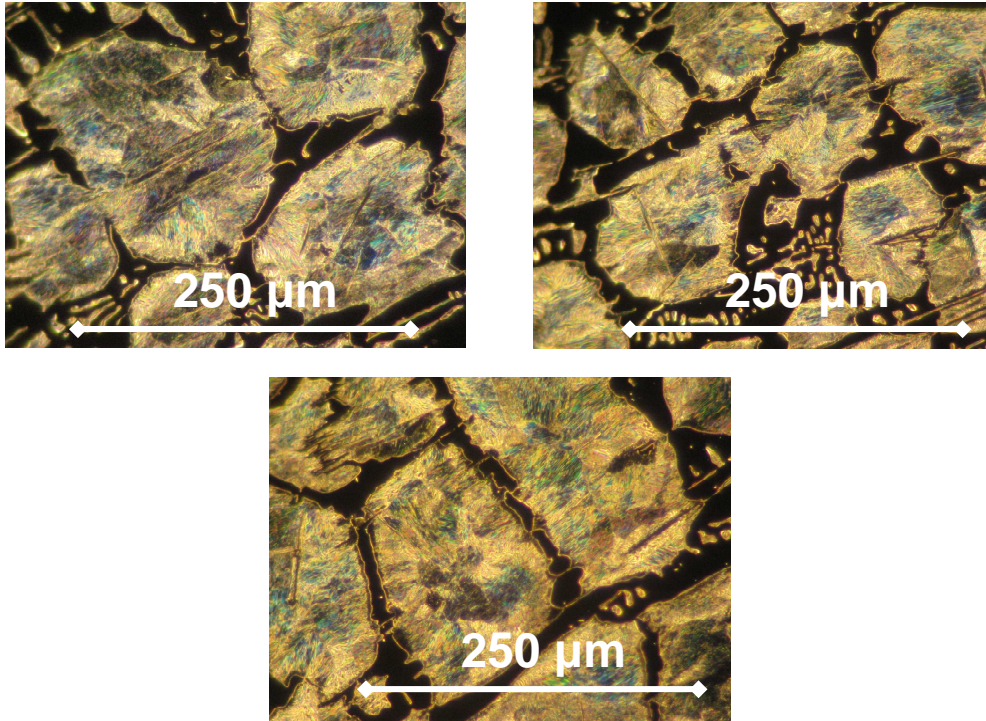


Figura.171: Estructura del acero de las figuras.167, 168 y 169, carburizado a 1340°C y enfriado al aire. Obsérvese el volumen ocupado por la cementita, claramente ledeburítica, y el grosor de la malla. Compárese esta estructura con la de la figura 168 y 170.

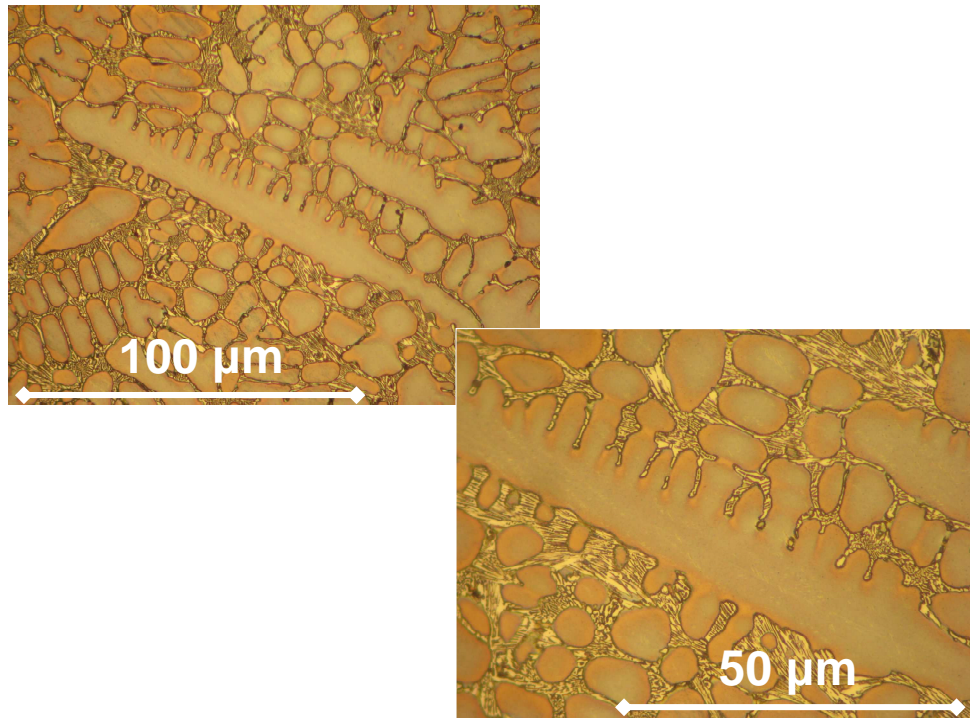


Figura.172: Se trata de la estructura de colada de un acero de herramientas al cromo hipercarburado (UNE 5212 - DIN X210 Cr12; C:2%, Mn:0'3%, Si: 0'3%, Cr: 12%). Se pueden observar las dendritas de austenita estable y todo el carbono en los espacios interdendríticos, en la ledeburita, como carburos mixtos de cromo y hierro. Muchos aceros hipercarburados de herramientas, de baja o alta aleación, se presentan como aceros ledeburíticos de herramientas. Su forja se realiza de igual manera que los aceros de Damasco, aunque con menos precauciones.

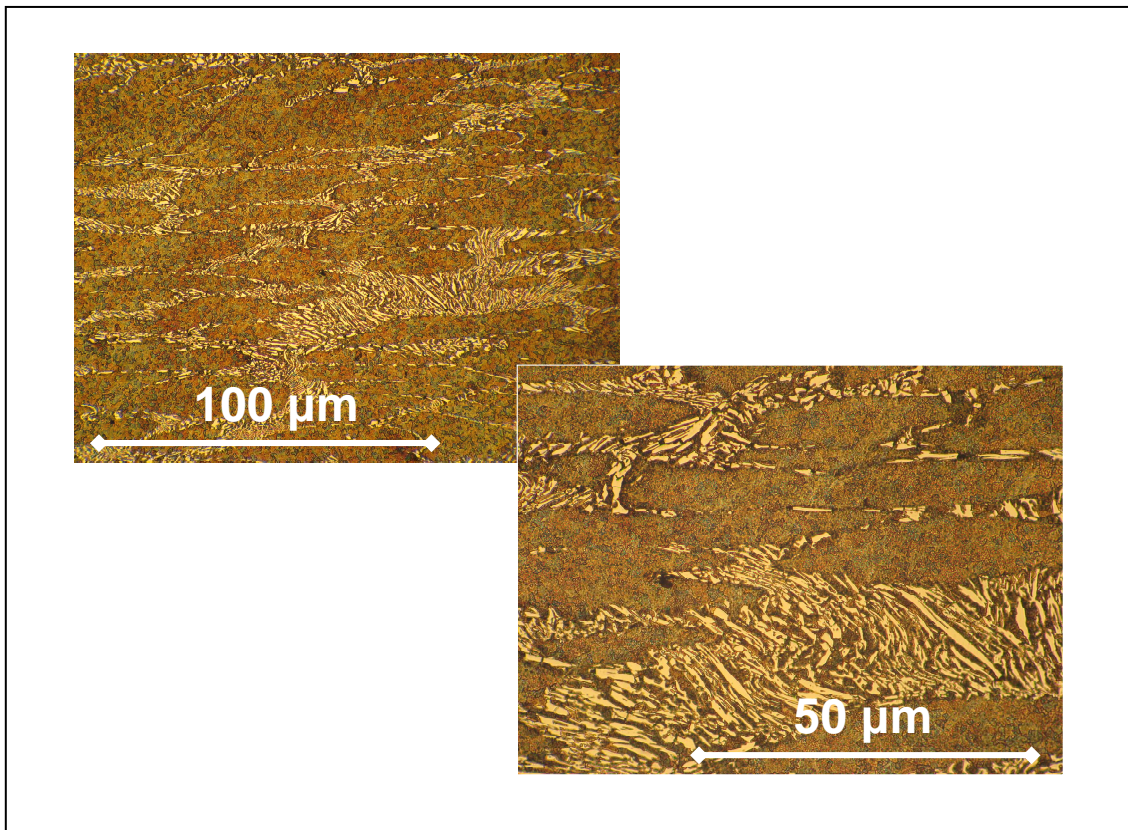


Figura.173: Estructura del acero ledeburítico aleado de herramientas de la figura.172 en los primeros estadios de la forja en caliente. Se observan bandas de carburos mixtos de cromo y hierro, muy parecidas a los Damascos, pero de tamaño más fino y de dificultoso ataque químico para resaltarlas. Para obtener la máxima tenacidad en estos aceros se debe continuar la forja hasta afinar muchísimo más los carburos.

Por otro lado, la etapa B, recocido subcrítico evitando la decarburación, es de vital importancia para permitir una forja correcta. Es evidente, que si efectúa una forja en caliente, siempre por debajo de 760°C, muy suave y cuidadosa, al principio, puede destruirse la malla de cementita proeutectoide, en superficie, y continuar, más tarde, con una forja más enérgica. Esto no está exento de riesgo de fragilizar el acero y destruirlo. Es más, esto ocurre casi siempre, por mucho cuidado que se ponga. Sin embargo, al igual que en los aceros de herramientas hipercarburados actuales, la segmentación y globulización parcial de la cementita proeutectoide, mediante recocido subcrítico, permite acabar con la continuidad de la malla de cementita proeutectoide y permitir una matriz de austenita continua. Esto evita que se produzca fractura durante la forja; aunque es necesario realizar ésta, en los primeros momentos, de forma cuidadosa y poco enérgica aumentando progresivamente los esfuerzos de deformación plástica.

La etapa C, es muy limitante; ya que toda la forja en caliente, de los aceros de Damasco, debe hacerse en el intervalo de temperaturas entre 760°C y 650°C. Si en algún momento del proceso, se supera el límite superior, la regeneración de la malla de

cementita, arruinaría la pieza. Este cuidado en no superar los 760°C, durante la forja, acarrea un elevado número de ciclos de calentamientos y forja, lo que supone un trabajo tedioso en el que la atención debe ser máxima, para evitar distracciones de consecuencias penosas. Se necesitan, por tanto, maestros herreros que dominen los tiempos y los ciclos con una paciencia infinita, para llegar a un final feliz.

La secuencia metalográfica resumida de nuestra propuesta tecnológica es como sigue:

1ª Fase. Obtención, por carburización en crisol cerrado, de un lingote (wootz): calentamiento entre 1270°C y 1370°C durante 12-16 horas y enfriamiento al aire. Es fundamental conseguir la ledeburitización del acero hipercarburado.

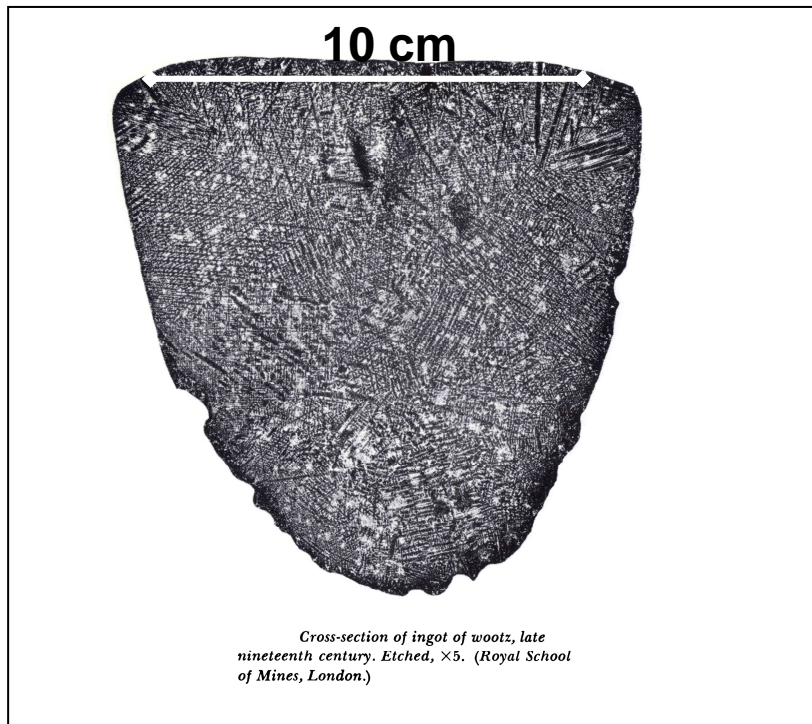


Figura.174: Lingote típico wootz, procedente de la India, de un contenido en carbono del 1'4% en masa. Obsérvese la estructura dendrítica de este acero ledeburítico.

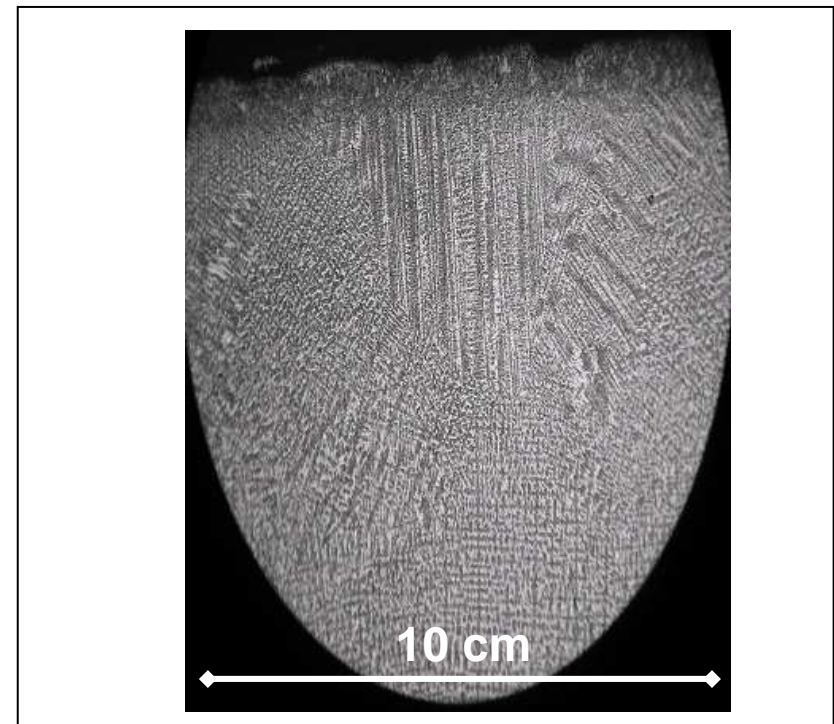


Figura.175: Macrografía de la sección de uno de los lingotes obtenidos por carburización a 1300°C durante 12-16 horas. Obsérvese la estructura dendrítica de este acero ledeburítico del 1'8% C en masa.

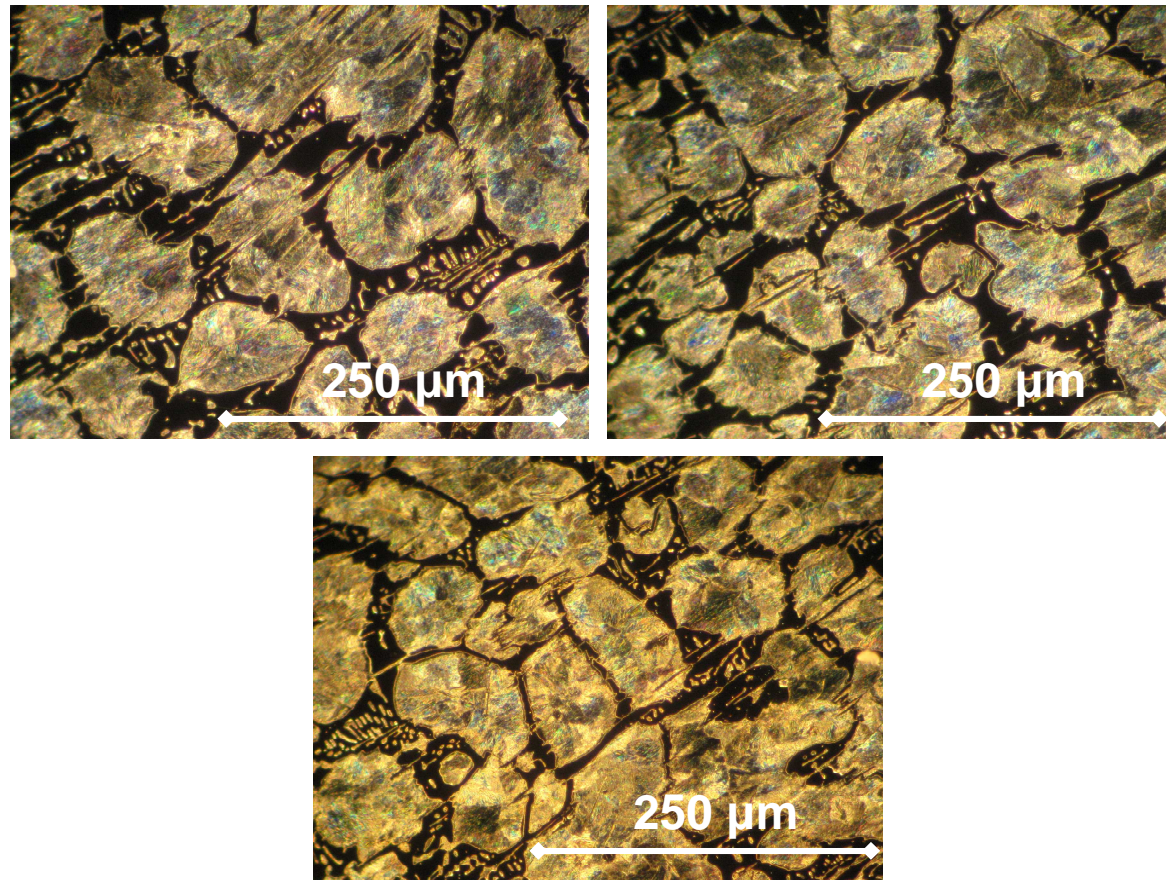


Figura.176: Detalle, a mayores aumentos, de la estructura observada en la macrografía del lingote (figura.175). Las imágenes están obtenidas en campo oscuro.

2ª Fase. Recocido subcrítico a 660°C durante 72 horas con revestimiento de arcilla para evitar su decarburación superficial.

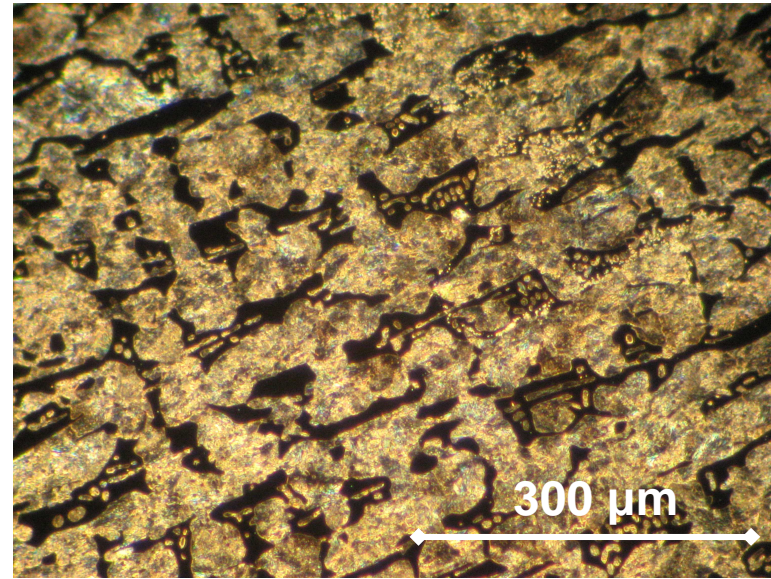
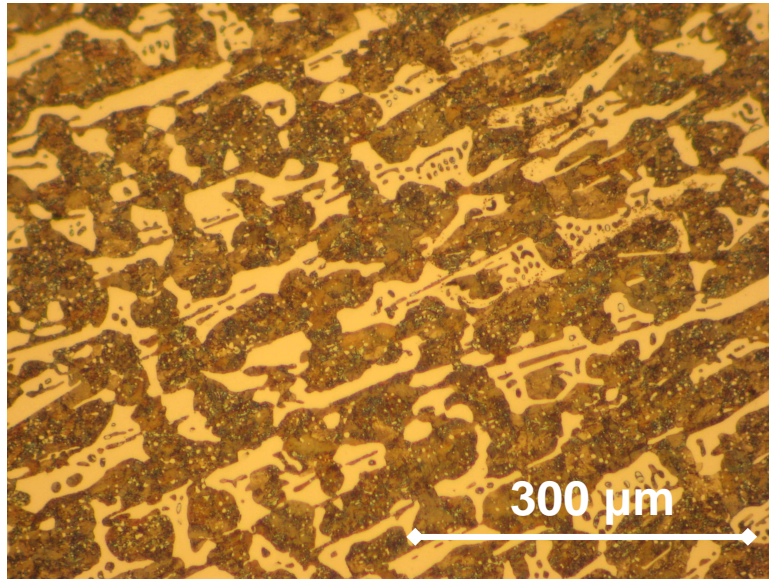


Figura.177: Estructura resultante del recocido subcrítico de ablandamiento. Se trata de un detalle de la estructura de la macrografía de la figura.175, después del tratamiento de recocido. Obsérvese la fragmentación producida en la cementita ledeburítica. La matriz es perlítica debido a que se enfrió, después del tratamiento de recocido subcrítico, al aire. La micrografía de la derecha ha sido obtenida en campo oscuro.

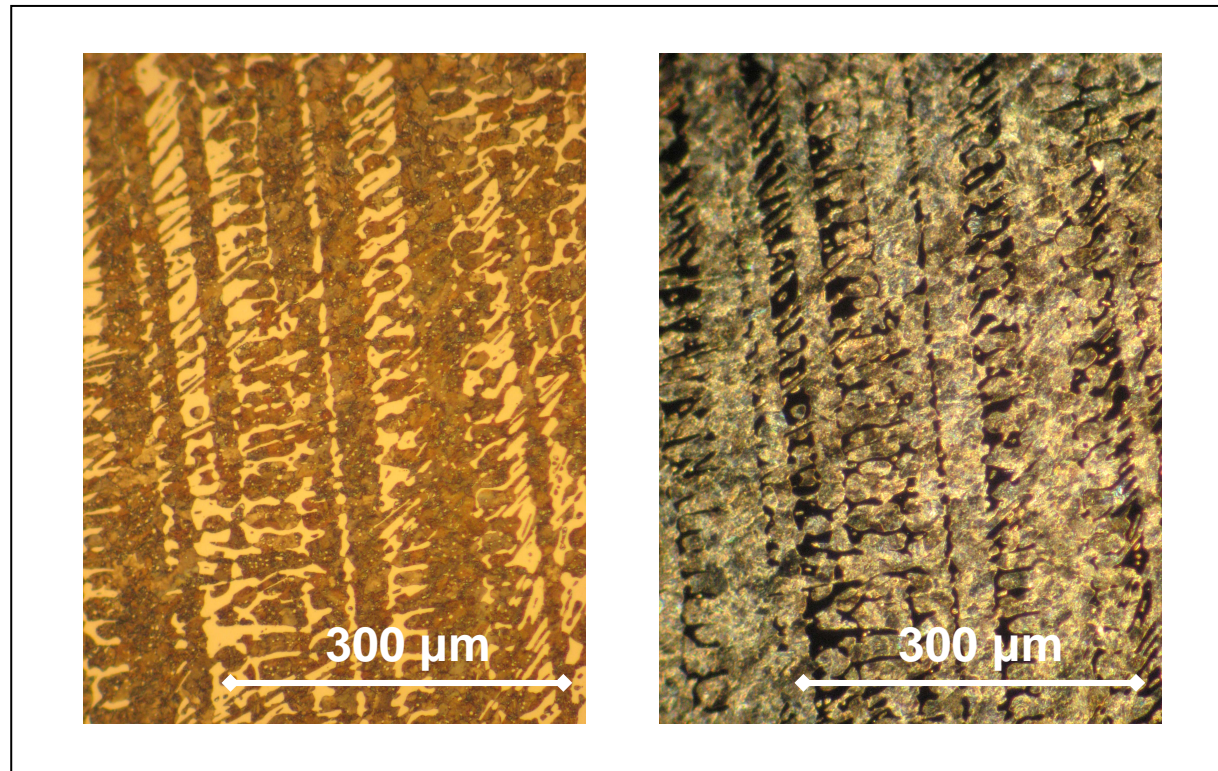


Figura.178: Otro detalle de la estructura del lingote de la figura.175, después del recocido subcrítico. Obsérvese la fragmentación de la cementita ledeburítica. Los astutos maestros herreros, en ocasiones, forjaban estos lingotes respetando la direccionalidad de la estructura dendrítica de solidificación. La micrografía de la derecha ha sido obtenida en campo oscuro.

3ª Fase. La forja previa en martillo pilón y/o en laminadora manual y posterior forja manual, en el intervalo de temperaturas entre 650°C y 760°C, produce un alineamiento de los cristales de cementita ledeburítica, en bandas con trazados dispares según los esfuerzos aplicados, y una globulización intensa de los cristales de carburo de hierro, incluidos los ledeburíticos o proeutectoides.

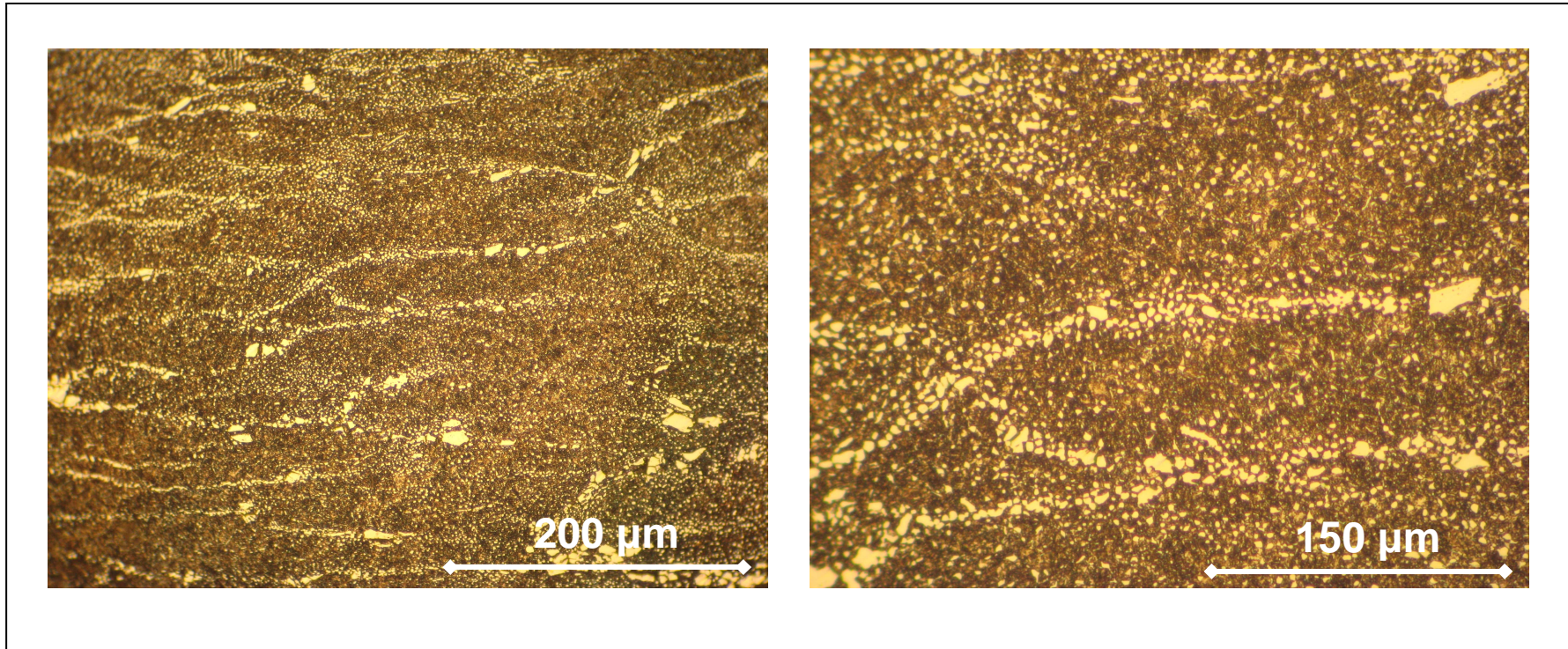


Figura.179: Estructura resultante de la forja en caliente, en el intervalo de 650°C a 760°C, del acero de las figuras 177 y 178. Obsérvese la intensa globulización de los carburos de hierro de las distintas procedencias y su alineamiento en bandas, que son las que producen las características marcas superficiales de los aceros de Damasco.

4ª Fase. Acicalado de la pieza forjada. Desbaste y pulido cuidadoso, seguidos de un ataque oxidante con Nital al 4% o FeCl_3 en solución alcohólica acidificada con HCl. Para que el ataque revele las marcas superficiales, características del acero de Damasco, la matriz debe ser ferrítica, esto es, en ausencia de temple.



Figura.180: Marcas superficiales en el shamshir de Mehemet Alí forjado por Assad Allâh al-Isfahânî.

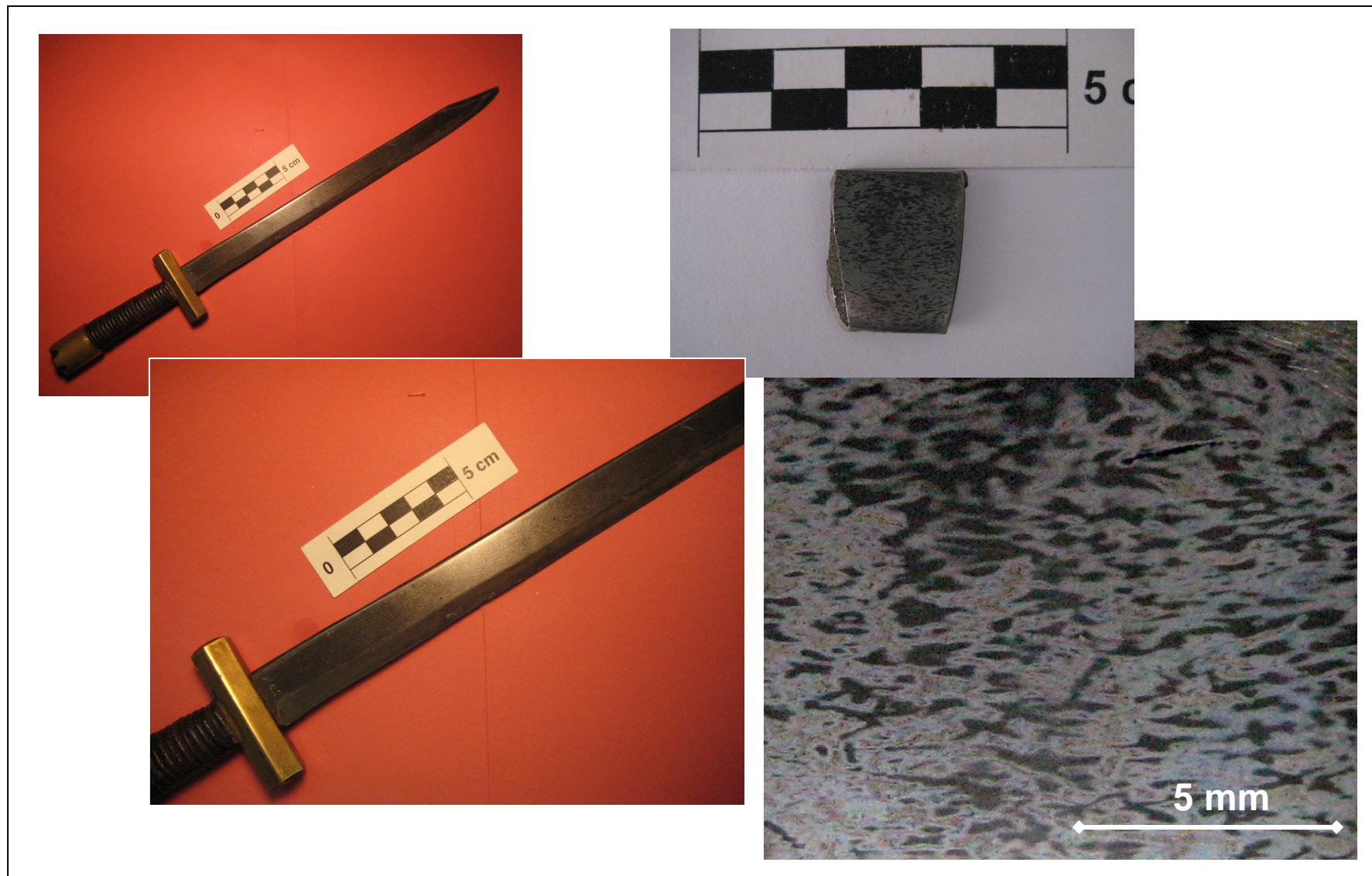


Figura.181: Marcas superficiales del puñal “Matador” fabricado en nuestro laboratorio.



Figura.182: Marcas superficiales del puñal “Yamil” fabricado en nuestro laboratorio.

5ª Fase. La mayoría de las armas fabricadas en acero de Damasco, no mostraban marcas porque iban templados, o éstas, eran muy finas. Su acicalado final, tras el temple en aceite desde 760°C, consistía en un desbaste y pulido muy cuidadosos.



Figura.183: Puñal forjado con acero de Damasco por el maestro Juan Pozón, en su herrería de Córdoba, y acicalado en nuestro laboratorio. Está templado en aceite y presenta una dureza de 58 HRC



Figura.184: Puñal forjado con acero de Damasco por el maestro Juan Pozón, en su herrería de Córdoba, y acicalado en nuestro laboratorio. Está templado en aceite y presenta una dureza de 58 HRC



Figura.185: Puñal forjado con acero de Damasco por el maestro Juan Pozón, en su herrería de Córdoba, y acicalado en nuestro laboratorio. Está templado en agua con sal muera y presenta una dureza de 63 HRC

VI. CONCLUSIONES

1. De la investigación histórica se deriva, que el denominado acero de Damasco, aunque su existencia es más antigua, se circunscribe a la existencia del mundo islámico y sus fronteras geográficas históricas naturales. El desarrollo de su tecnología se adapta al nacimiento y auge económico del imperio musulmán y, su decadencia, coincide con la de éste.
2. El arte y tecnología de este tipo de acero se produce en todos los rincones del imperio islámico, incluido Al Andalus, donde aparece en el reinado del emir Abderrahmán II (792-852) y desaparece con el mundo andalusí; apagándose lentamente entre los mudéjares de los reinados castellano-leoneses con capital en Sevilla (siglo XIV).
3. También ha quedado de manifiesto que su nombre genérico entre los árabes, y musulmanes medievales en general, es el de *al-hindi*, es decir, *acero indio*. Para el mundo castellano-leonés la palabra derivada del árabe de los andalusíes, que denominaba este tipo de acero, es *alinde* o *alfinde*.
4. Las marcas superficiales, que han hecho célebre a las armas fabricadas en acero de Damasco, en el mundo occidental, no son definitorias de este acero; ya que sólo las presentaban aquellas, fabricadas bajo la influencia oriental del mundo islámico, cuyo centro principal fue Persia, y más concretamente, los talleres de la ciudad de Isfahân.
5. El taller más valorado, a nivel mundial en la actualidad, es el de Assad Allâh al Isfahânî. Para que las marcas superficiales de las armas fabricadas con este acero, sean visibles a simple vista, deben presentar unas dimensiones ópticas mínimas; esto es, su grosor y espaciado deben superar el mínimo permitido por nuestra agudeza visual: $>> 50 \mu\text{m}$.
6. Basándonos en los shamshires fabricados por el taller del maestro persa, antes citado, los estudios metalográficos y mediciones de algunos de sus ejemplares, hemos llegado a la conclusión de que partían de aceros base, lingotes, con estructuras metalográficas constituidas por grandes cristales de cementita ledeburítica, causantes del efecto óptico final, de la superficie de las armas, después de la forja.
7. La única manera que existía de obtener un acero de ultraalto contenido en carbono, en épocas antiguas, medievales y modernas, era su fabricación a partir de hierros y aceros de bajo contenido en carbono, por carburización en crisoles cerrados, de ahí su denominación europea occidental de acero al crisol.
8. La carburización del acero al crisol, u obtención del lingote wootz de acero indio, consistía en calentar un trozo de hierro al acero suave en un crisol de arcilla refractaria, herméticamente cerrado, en cuyo interior, además del hierro o acero suave, se introducía carbón vegetal triturado convenientemente. El calentamiento de los crisoles, con los trozos metálicos, de las dimensiones de las piezas que se

querían forjar, se realizaba a temperaturas muy elevadas, entre los 1270°C y 1350°C, durante 12-16 horas. Pasado este tiempo, se sacaban del horno y se dejaban enfriar al aire.

9. Del enfriamiento al aire, de la estructura semifundida, obtenida por carburización a temperaturas elevadas de entre 1270°C y 1350°C, se obtenía una estructura dendrítica ledeburítica muy característica de todos los lingotes wootz recuperados hasta el presente. La estructura de grandes cristales interdendríticos de cementita ledeburítica, semejantes en todo a los aceros actuales hipercarburados de herramientas, son la causa más determinante para la aparición de las marcas superficiales, características de los Damascos que las presentan, fundamentalmente, de los talleres persas de Isfahân.
10. la imposibilidad de la forja directa en caliente, de estos aceros hipereutectoides, de ultraalto contenido en carbono, obligaba a un recocido subcrítico a temperaturas de alrededor de los 760°C, para provocar la segmentación y globulización parcial de la cementita ledeburítica. El tratamiento de endulzamiento del acero duraba alrededor de las 72 horas. Para evitar una fuerte decarburación, durante este proceso, se le recubría con un revestimiento de arcilla refractaria.
11. El acero endulzado por recocido subcrítico a 760°C, durante 72 horas, quedaba apto para su forja en caliente. Esta, se realizaba, a temperaturas que oscilaban entre los 650°C y los 760°C. Superar el límite superior de temperatura de forja, suponía la fragilización y ruina de la pieza de acero; hecho este, junto con la etapa anterior de endulzamiento que hizo exclamar, a A.F. de Rëamur (siglo XVIII), que ningún herrero occidental había logrado nunca forjar unos de esos wootz de la India. Es muchos siglos después, en el siglo XX, cuando los occidentales descubren la forja de los aceros de herramientas hipercarburados.
12. Si el acero fue endulzado debidamente y, la forja se realizó de forma correcta, sin recalentones, se pasaba, si ese era el caso al temple del arma. Este se realizaba desde temperaturas subcríticas, es decir, desde los 760°C aproximadamente, en aceite, o mezclas aceitosas, consiguiéndose unas estructuras de grandes cristales globulizados de cementita proeutectoide en una matriz de martensita en austenita retenida. El conjunto presentaba una buena dureza (55-58 HRC), una gran resistencia al desgaste por la presencia de abundante cementita y una tenacidad notable. La resistencia mecánica (alrededor de los 190-200 Kg/mm²) y la potencia de corte de su filo las hicieron insuperables.
13. En el caso de obtener las bellas marcas superficiales, inherentes a las armas fabricadas en los talleres medievales de Isfahân en Persia y, en particular, del maestro Assad Allâh al-Isfahânî, era necesario obviar el temple para obtener una matriz ferrítica. La presencia de bandas, suficientemente separadas, de grandes cristales de carburos de hierro ledeburíticos, hacían que, el acicalado final del arma, desbaste, pulido y ataque oxidante en medio ácido ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$), provocara la aparición de esas bellísimas marcas alternadas, en claro y oscuro, con formas irrepetibles.

VIII. APÉNDICE

En nuestra investigación han sido decisivas las crónicas de dos sabios musulmanes medievales: al-Kindi y al-Biruni. Hemos creído interesante reflejar en el apéndice unos textos traducidos del árabe clásico original al inglés, de estos autores que hacen referencia a fabricación, clasificación, etc..., de espadas de acero indio: al hindi (Acero de Damasco).

El Apéndice-I es la traducción al inglés de Robert Hoyland^[128] de una edición en árabe de Abd al-Rahman Kaki: “Al-suyud wa-ajnasuha” (Bulletin of the Faculty of Arts, vol.14, El Cairo (1952)).

En esta obra se reúnen tres manuscritos de al-Kindi, Abu Yusuf Yaqub ibn Isaac al-Kindi (Kufa 801- Bagdad 873), que trabajó sobre filosofía, astrología, astronomía, cosmología, química, lógica, matemáticas, música, medicina, física, psicología y meteorología:

1. Manuscrito de Leyden (Ms. Leiden Or.287, fols. 155-159).
2. Manuscrito de Estambul (Ms. Istanbul Ayasofia 4832, fols. 170-172).
3. Manuscrito de Turín (Biblioteca P.Kahle. Ms. Meyerhof, H24).

El Apéndice-II es una traducción al inglés de Brian Gilmour and Robert Hoyland^[128] de unos relatos del libro “Kitab al-jamahir fi marifat” de al-Biruni, Abn r-Raihan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (Kath (Uzbekistán) 973- Gazni (Afganistán) 1048), sabio que trabajó sobre historia, astronomía, astrología, matemáticas y farmacología.

No hemos realizado la traducción del inglés al español para no perder matices con una traducción de una traducción. Aún no se ha realizado ninguna traducción directa del árabe al español, lo que sin duda sería muy interesante para los que obtenemos información fiel de estos autores.

Chapter 2

رسالة يعقوب بن اسحاق الكندي إلى بعض الخلفاء¹ في جواهر السيوف

(5) أمر مولانا الإمام أن أرسم أوصاف السيوف بقول يعم أجناسها². وقد رسمت [أطال الله بقاءك]³ في كتابي هذا جميع [ما سألت عنه من أمرها مع] الفراسات الكاشفة عن أسرارها والمخرجة في علم أجناسها والقواطع والكل⁴ منها بقدر ما بلغه علمي وأحاط به فكري [وبالله التوفيق].

[اعلم أن] الحديد الذي تطبع منه السيوف ينقسم قسمين أوليين: إلى المعدني وإلى⁵ الذي ليس بمعدني. والمعدني ينقسم قسمين: إلى الشابرقاني وهو المذكر الصلب القابل للسقي بطباعه وإلى الترماهن وهو المؤنث الرخو الذي ليس يقابل للسقي بطباعه. وقد يطبع في⁶ كل واحد من هذا الحديد⁷ مفردا ومنهما⁸ معا مركبين. فجميع أنواع السيوف المعدنية ثلاثة⁹: (6) الشابرقانية والترماهنية والمركبة منهما. وسنحدها نوعا نوعا ونأتي على [جميع] ما يلزم الحاجة إليه من وصفها في موضع ذلك [إن شاء الله].

فأما الحديد الذي ليس بمعدني فهو الفولاذ ومعناه المصفي ويصنع من المعدني بأن يلقي عليه في السبك شيء يصفيه ويشد رخاوته حتى يصير متينا لدنا يقبل السقي ويظهر فيه فرنده. وهذا¹⁰ الفولاذ ينقسم [إلى] ثلاثة أقسام: إلى العتيق والمحدث و[إلى] لا¹¹ عتيق ولا محدث. وقد تطبع من هذه جميعا السيوف. (7) فأنواع السيوف الفولاذية ثلاثة: عتيق ومحدث ولا عتيق ولا محدث.

¹ الخلفاء: 1 (اسطنبول) "إخوانه".

² توجد هذه الجملة في ل (لين) فقط. أعطيت نص مقدمة مخطوطة 1 في الباب السابق.

³ في هذا الباب تشير الأقواس المربعة إلى كلمات توجد في 1 فقط (من ثون ل).

⁴ هذا اقتراح زكي ولكن في أول "النكل" (بدون تنقيط).

⁵ هذه الكلمة غير موجودة في 1.

⁶ في: 1 "من".

⁷ هذا الحديد: 1 "هذه السيوف".

⁸ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "فيهما".

⁹ في أول تكتب هذه الكلمة دائما "ثلاث ثلاثة" (يعني بدون الف).

¹⁰ فرنده وهذا: 1 "فرندا وهو".

¹¹ هذه الكلمة موجودة في أول ولكنها غير موجودة في زكي.

Chapter 2: Translation

A treatise of Ta' qû b ibn Ishâq al-Kindî to one of the caliphs¹ on the natures of swords

(5) Our lord the imam has ordered me to set out the characteristics of swords in an account that encompasses all their kinds (see Fig.8). I have therefore set out [may God give you long life] in this treatise of mine all [that you asked about them together with] the insights that reveal their secrets and educate in the science of their kinds, both the trenchant and the blunt, as far as my knowledge can attain and my intellect can grasp [and in God lies success].²

[Know that] iron (*hadîd*), from which swords are forged (*tutba*^c), is divided into two primary categories: mined (*ma^cdanî*) and unmined (*laysa bi-ma^cdanî*). The mined is itself divided into two categories: hard iron (*shāburqān*), which is male, hard, and able to be quenched (*saqy*) during its forging; and soft iron (*narmāhan*), which is female, soft, and cannot be quenched during its forging³. Swords may be forged from either on its own and also from both put together. So there are in all three types of mined swords: (6) those made from hard iron, those made from soft iron, and those made from a compound of the two (*murakkaba*). We shall define them type by type, and [everything] that is necessary for their description we shall mention in the proper place [God willing].

As for the unmined iron, it is steel (*fūlādh*), meaning refined (*musaffā*). It is manufacture (*yusna*^c) from mined iron by adding to it during the melting (*al-sabk*) something which refines it and makes its softness strength so that it becomes firm and pliable, can be quenched, and so that its watering (*firind*)⁴ appears in it (see Fig. 10a & b). Steel is divided into three categories: ancient, modern, and [into] neither ancient nor modern, and from all of these words may be forged (7). So there are three types of

ولم نذهب من عتيقها إلى الزمان لأن عتيقا مطلقا لا يقال إذا قصد به الزمان إلا إلى¹² أحد معنيين إما أول الأشياء فقط والأول واحد في كل مبتدأ صنعه وإما كل واحد من الأشياء إذا أضيف إلى ما هو أحدث منه فيجب إذا أن يكون كل شيء عمل بعده شيء آخر مستحقا أن يسمى عتيقا. وليس العتيق من السيوف بسيف واحد [ولا أصلها كلها إلا واحد] بل إنما يذهب من عتيقها إلى الكرم كما يقال فرس عتيق يراد به كريم. فما لحقته خواص الكرم فهو عتيق في أي دهر صنع¹³ والطرف الأبعد من العتيق هو ضده في المعنى أعني ما عدم خواص العتيق منه¹⁴ فلذلك سمي [بضد اسمه أعني] محدثا وإن كان قد طبع قبل زمن عاد. وأما الأخذ بعض خواص العتيق وعادمة¹⁵ بعض خواصه ف[هي التي] وجدت فيها بعض خواص المحدث فسميت أيضا باسم متوسط بين الاسمين فقل ليس بعتيق ولا محدث وإن كان متقادما الزمان أو حديثا فاختار¹⁶ الصياغة لها اسما لا عتيقا [في بعضها]¹⁷ (8) ولا محدثا في بعضها¹⁸. فلذلك وقع هذا التمييز من الحديد [في الحديد] المعمول أعني الفولاذ [لا] المعدني الذي لم يمزج بشيء غيره كالشابرقان والنرماهن. [لأنه] لو كان استحق اسم العتيق بالزمان لكان في الشابرقان والنرماهن ما [قد] طبع منذ زمن قديم [وما يطبع الآن فيسمى القديم] بالزمن العتيق والمحدث بالزمان المحدث. ولكن لما كان الشابرقان والنرماهن معادن واحدة غير مغيرة بتفاصيل مهينة¹⁹ أدخلت على جواهرها شيئا غيرها²⁰ إلى الجودة أو الرداءة لم يسم منها شيء بـتة عتيقا ولا محدثا بل سمي بأسمائها إما شابرقان وإما نرماهن.

¹² إلى: "أعلى".

¹³ صنع: "أ" "كان طبع".

¹⁴ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹⁵ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "عادت".

¹⁶ اختار: "اختص".

¹⁷ زيادة عن أ غير منكرة في زكي.

¹⁸ اللفظة "في بعضها" موجودة في أول ولكنها غير موجودة في زكي.

¹⁹ هذا اقتراح. في أول "بتفاصيل مهينة" (بدون تنقيط) وفي زكي "بمناصل مهينة".

²⁰ شيئا غيرها: "أ" "الشياء غيرها".

steel swords: ancient (^c*atīq*), modern (*muhdath*) and neither ancient nor modern (*lā^c atīq wa-lā muhdath*).

The ancientness of swords is not related to time, for one certainly should not use the term ancient when one thereby intends time, except in one of two cases. These are for the first of things, since the first of anything is unique at the very beginning of its manufacture; or else for anything which is put with what is moderner than it, for if everything is made after it, it must deserve to be called ancient. The ancient among swords does not, however, correspond to a unique sword [nor to the original of them], but rather its ancientness is related to nobility (*karam*), just as when it is said of a horse that it is ancient, it is meant thereby that it is noble. So to whatever there pertains qualities of nobility, then it is ancient no matter in what age it was manufactured. The furthest thing from ancient is its opposite in meaning, that is, what lacks the qualities of the ancient, and it is accordingly called [by the opposite of its name, that is] modern, even if it were forged before the time of ^cAd⁵. As for those swords possessing some of the qualities of the ancient and lacking some of its qualities, [they are those in which] are found some of the qualities of the modern, and hence they are called by the intermediate name of neither ancient nor modern, irrespective of whether they are advanced in age or recent. And the swordsmiths (*sayāqila*)⁶ have chosen for them this name of [in part] not ancient (8) and in part not modern. This distinction, therefore, occurs in respect of processed iron (*al-hadīd al-ma^cmūl*), that is, [un]mined steel, which is not combined with anything else (once it has been processed), as are hard iron and soft iron (which can be combined with each other). [For] if the term ancient was merited by virtue of time, then it would go to the hard iron and the soft iron, which have been forged since olden times [and which are forged now, and so in this case the old in time could be called] ancient and the recent in time modern. But since the hard iron and the soft iron are single metals, unchanged by base particulars⁷ that have introduced something into their natures (*jawāhir*) that would change them for better or for worse, nothing at all from them should be called ancient or modern; rather they are called by their names, either hard iron or soft iron.

والعنق ينقسم ثلاثة أقسام: أولها وأجودها اليماني ثم ثانيها القلعي (9) ثم ثالثها الهندي وهو المسمى الفاخرون.

وأما التي ليست بعتيقة ولا محدثة فتقسم قسمين أحدهما المسمى عند الصياغة غير مولد وهي سيوف تطبع باليمن من الحديد السرنديبي والسماني فيقال غير مولد السماني وغير مولد السرنديبي. وتسمى المعتوقة لأنها تعمل²¹ من السرنديبي والسمانية الصغار أعنى الدقاق القدود فتعق عرضها أعنى تعرض ويحكي بها اليماني فتسمى معتوقة.

²¹ هذه الكلمة موجودة في أول ولكنها غير موجودة في زكي.

Ancient swords are divided into three categories: the first and the most excellent is the Yemeni, the second is the Qala^{ʿi}⁸ (9) and the third is the Indian (Hindī)⁹, which are called the fāqirūn¹⁰.

As for those neither ancient nor modern, they are divided into two categories: the first of them is called by the swordsmiths foreign (*ghayr muwallad*)¹¹, which are swords forged in Yemen from the iron of Sri Lanka or Salmān¹², and so are called the

وقد تسمى هذه المعنوفة الأولى من الفاقرون [خاصة]²² لأنها أول السيوف في الترتيب مرتبة تلي

العتيق على وجه لأن عنصرها عتيق وهي أول ما يحكى به اليماني من السيوف... (11) وأما المولد فينقسم خمسة أقسام: منها الخراسانية وهي ما عمل حديده وطبع بخراسان. ومنها البصرية وهي ما عمل حديده وطبع بالبصرة. ومنها الدمشقية وهو ما عمل حديده وطبع بدمشق قديما. ومنها المصرية وهي ما طبع بمصر. وقد يطبع في مواضع غير هذه [كالبغدادية والكوفية] وغير ذلك من المواضع القليلة ولا تنسب إليها [لقنتها]...

... (9) والقسم الآخر المسمى غير عتيق وهي السلمانية [والسرنديبية والبيض. والسلمانية] ينقسم أربع أقسام²³: منها البهائج وهي سيوف عراض يكون السيف منها (10) عرضه أربع أصابع وأكثر و[لها] فرندا غليظ كبار جدا ومنها الرثوث وهي في العرض أربع أصابع وأقل من ذلك. ومن [ها] الصغار وهي سيوف دقاق الفرند²⁴ فإذا طبعت²⁵ حكى فرندا فرند العتيق فخرج بعضها يشبه فرند اليماني وبعضها يشبه فرند القلعي فتنسب الصياقلة كل واحد منهما إلى شبيهه من [العتيق ويدلسونها ب]²⁶ أسماء أشباهها. ومنها ما يطبع بسلمان²⁷. والسرنديبية تنقسم أربعة أقسام: منها التي تطبع²⁸ بسرنديب. ومنها الخراسانية وهو ما حمل من سرنديب وعمل حديده بخراسان²⁹. ومنها المنصورية وهو ما حمل حديده من سرنديب وطبع بالمنصورة. ومنها الفارسية وهو ما حمل حديده من سرنديب وطبع بفارس وتسمى الخسروانية.

²² زيادة عن ا غير منكرة في زكي.

²³ الكلمات "ينقسم أربع أقسام" موجودة في ا و ل ولكنها غير موجودة في زكي.

²⁴ في ا تكتب هذه الكلمة هنا وفي أمكنة أخرى: "الفرند".

²⁵ هذا الاقتراح زكي. في ا و ل "فقت" ولكنه مكتوب بتون تنقيط كامل.

²⁶ يكتب زكي "معتيق ويبلو نهاب" ولكن هذا غير معقول.

²⁷ في ا و ل "بيلمان" (بتون تنقيط في ا).

²⁸ منها التي تطبع: ا "منها ما يقال له التي وهي ما طبع".

²⁹ حمل من سرنديب وعمل حديده بخراسان: ا "حمل حديده من سرنديب وطبع بخراسان".

foreign Salmāni swords and the foreign Sri Lankan swords. They are called “made ancient” (*maʿtūqa*), because they are made from the Sri Lankan and the small- that is, the finely-proportioned- Salmāni swords. Thus their presentation is made ancient, that is, they are presented and made to resemble the Yemeni, and so they are called “made ancient”. These “made ancient” swords are classified first after the *fāqirūn*, [in particular] because they are the first swords in the order of succession nearest the ancient in accordance with the fact that their constituents are ancient and they are the nearest of swords in resemblance to the Yemeni... (11). As for the indigenous (*muwallad*)¹³, it is divided into five categories. Among them is the Khurasani, of which the iron is worked and forged in Khurasan (a province of northern Iran). And among them is the basran, of which the iron is worked and forged in Basra. And among them is the Damascan, of which the iron has been worked and forged in Damascus since olden times. And among them is the Egyptian, which are those forged in Egypt. And they may be forged elsewhere, [like Baghdad and Kufa] and a few other places, but they are not attributed to these places [because of their rarity]...¹⁴

... (9) The other category, called modern (lit. not ancient), comprises the Salmāni swords, [the Sri Lankan (*al-Sarandībīya*) swords and the white swords (*bīd*)¹⁵. The Salmāni] are divided into four categories. Among them is the *bahāng*¹⁶, which are broad swords, each (10)having a breadth of four fingers and more, and their watering is rough and very large. And among them are the *rathūth*¹⁷, which have a breadth of four fingers or less. And among them are the small swords, which are swords of fine watering, and when forged¹⁸ their watering resembles that of the ancient. Some come out resembling the watering of the Yemeni and some resembling the watering of the Qalaʿi, and the swordsmiths attribute them to the ancient sword that they most resemble and [fraudulently give them] the names of those they resemble. And among them are those forged at Salmān¹⁹. The Sri Lankan is divided into four categories. Among them are those forged in Sri Lanka. And among them are the Khurasani, which are those brought from Sri Lanka and its iron worked in khurasan. And among them are the Mansūri, of which the iron is brought from Sri Lanka and they are forged at Mansūra²⁰. And among them are the Farsi, of which the iron is brought from Sri

والخسروانية تنقسم قسمين: منها ذوات تماثيل وشجر وغير ذلك من الصور ومنها السواذج. والبيض تنقسم قسمين: منها الكوفية طبعت بالكوفة [في أول زمن الكوفة] وهي المسماة الزيدية طبعها رجل يقال له زيد [فنسبت إليه] ومنها الفارسية.

... (11) وهذه جميع أصناف السيوف المذكورة من الحديد المعمول أعنى الفولاذ. فأما الحديد المعدني فإن منه كما ذكرنا: الشابرقان وهو المسمى الذكر من الحديد [ومنها] النرماهن وهو المسمى [الأنثى] من الحديد³⁰. وقد تطبع من الذكر سيوف وهي سيوف يابسة تنكسر سريعا إذا لقيت الكرائه وتسرع في اللحم إلا أنها لا يستوي سقيه لأن الذكر من الحديد تكون فيه عروق لينة نرماهن فتقع في شفارها كثيرا فلا تقبل هذه العروق السقي (12) فتجلس³¹ عند الضرب. فأما ما قبل منها السقي فتبتتر غروبها إذا لقيت الكرائه أو تنكسر³² فليس يكاد أحد أن يطبع منها إلا جاهل بها أو ضرورة في موضع لا يمكن فيه غير الحديد الذكر. وهذه السيوف لا فرند لها في طرح ولا غيره وحديدتها كله لون واحد. وهي جاسية لا تتثنى ولا تهتز ولا صفاء لحديدتها ولا ماء شديدة السن مختلفة الشفار مواضع [منها]³³ خشنة ومواضع لينة. وقد تطبع من النرماهن سيوف يتخذها الروم والشرارة. وأما المركبة من شابرقان ونرماهن فتتقسم قسمين: منها الفرنجية ومنها السليمانية.

وخواص العتيق الذي يفضل من باقي [الحديد] هي الاكتناز والمتانة واللدانة ما لم يحمل عليه [في] السقي وشدة الصقالة وصفاء المكاسير وميلها إلى البياض وحمرة حمأها وتوبالها كحمأ النحاس وتوبالها وجعودة الفرند وتعدده واستواء الفرند في كل السيف لا يكون (13) بعضه دقاقا طوالا وبعضه طوالا غلاظا [وبعضه قصارا غلاظا] وبعضه قصارا دقاقا بل متساويا³⁴ في قدر قريب من التساوي وفيها عقد صغار كالفلفل كعقد فرند الخشب وسأبين محنه مواضعها التي رسمها فيها أصلح وأبين. وكذلك أرسم جميع معاني هذا الكتاب رسما يكون أوضح وأسهل في فهمه وإن خرج ذلك عن نظمها على ترتيب القسمة التي قدمت. فأما خواص باقي³⁵ أنواعها فسأذكرها عند ذكرها وخواص كل واحد من أنواع العتيق [أيضا].

³⁰ اللفظة "من الحديد" موجودة في أول ولكنها غير موجودة في زكي.

³¹ هذه الكلمة غير واضحة في المخطوطين ومكتوبة بدون تنقيط كامل. يقترح زكي "فتبتتر".

³² هكذا في أ. في ل "انكسر" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

³³ زيادة عن أ غير منكرة في زكي.

³⁴ في أول: "بعضه دقاقا طوالا وبعضه طوالا غلاظا" [وبعضه قصارا غلاظا] وبعضه قصارا دقاقا بل متساويا [أ. مستوي].

³⁵ هكذا في أ وهو اعترض من قراءة ل "الذكر".

Lanka and forged in Fars, and they are called imperial (*Khusrawānīya*)²¹. The latter is itself divided into two categories: those bearing figures and trees and other images, and the plain swords (*al-sawādhij*). The white swords are divided into two categories: the kufan, which was forged in Kufa [in the earliest period of the city's history], and it is also called Zaydi, forged by a man called Zayd [and attributed to him], and the Farsi (see Fig.11).

... (11) All these sorts of swords mentioned above are from processed iron (*al-hadīd al-ma'cūl*), that is, steel. As for moned iron, there derives from it, as we have said, hard iron, called the male type of iron, and [from it is] soft iron, called [the female] type of iron. Swords may be forged from the male type, but they are dry swords that break (*tankasir*) quickly when they encounter adversity and soon have to be welded (*lahm*). Moreover, they do not quench evenly because the male type of iron contains pliant veins (^curūq) of soft iron, which often occur in its blades (*shifār*), and these veins cannot be quenched (12) and sit²² in the event of a blow. As for those of them which can be quenched, their cutting edges (*ghurūb*) are severed (*tubtar*) when they encounter adversity or they break, so almost no one would forge from them except one ignorant or in need, in a place where there is only male iron. These swords have no watering, neither upon throwing (*tarh*) of an etching substance upon them nor without; their iron is all of one colour. They are solid, do not bend or vibrate, and their iron has no purity nor water; they have a strong point (*sinn*), a variety of blades, and parts [of them] are rough and parts smooth. From the soft iron there are forged swords which are adopted by the Byzantines and the Shurat²³. As for those made from a compound of hard iron and soft iron, they are divided into two categories: the Frankish and the Sulaymāni²⁴.

The qualities of the ancient which make it better than the rest [of the swords] are compactness, firmness, flexibility – as long as it is not affected (*lam yuhmal* ^c*alayhi*) [during] quenching, an intense polishing (*saqāla*), and purity of fracture surfaces (*makāsīr*). Then there is its tendency towards whiteness, the redness of its slag (*hama*³) and its hammer-scale (*tūbāl*) like the slag and hammer-scale of bronze, the curliness of the watering and its knotting, and the evenness of the watering throughout the sword. There are not (13) parts of it fine and long and parts of it long and rough, [nor parts of it short and rough] and parts of it short and fine, rather it is very nearly perfectly even. In it are small knots (^c*uqad*) like peppers, like knots in the grain of wood. I shall explain the testing of it in the places where its exposition will be most

فأما القواطع منها من غير جهة جواهرها بل بأشكالها ف[هي] قصارها إذا جادت متونها واستوت³⁶ سطوحها وتخنها. [ولم يكن فيها موضع داخل وموضع خارج] (14) ولم يكن فيها موضع أثخن من نظيره³⁷. وغلظ[ت] شفارها ما خلا نفس الحد فإنه ينبغي أن يكون الحد قدر شعرة من كل جانب فهذه أقطع السيوف للكرانه. فأما أقطع[ها] للشباب واللحم فما استجمعت فيه هذه الصفات³⁸ جميعا ما خلا غلظ الشفرة فإن أرقها شفارا أقطعها للحم والشباب وليست بالمحمودة ما رق[ت] شفاره[ا]. واعتدال السقي عون على القطع فإن سقيه إن اشتد انبقرت شفاره عند الكرانه [وإن لأن سقيه فاشتد شفاره عند الكرانه]³⁹.

وأما قدود كل نوع منها⁴⁰ فسنذكرها إذا ذكرنا كل نوع منها بخواصه فإن في ذلك عوننا على معرفة أنواعها وإن كان قد يمكن أن يشبه القد بالقد ويحكي في غير ذلك العنصر من الحديد ولكن علمها على حال زيادة في المعرفة بأنواعها. إذا وافق القد الحديد كان أصدق شهادة فإذا اختلفا فإن الحديد⁴¹ اصدق شهادة من القد وأولى بأن يحكم به. وقد تستعمل الصياقلة مكان اسم الفرند اسم الحديد فيقولون إذا كان ظاهر الفرند إنه لظاهر الحديد.

فأما الأرض [أعني أرض السيف] فسموها أرضا على حالها أعني⁴² الموضع من الحديد الذي لا فرند فيه. فيقولون أحمر الأرض وأخضر الأرض وأكدر الأرض. فمتى وجدتني في كتابي هذا أقول (15) أبيض الحديد أصفر الحديد أو غير ذلك من صفات حديد أضيفه⁴³ إلى السيف فإنما أعني الفرند. وإذا قلت قبل الطرح أو بعد الطرح فإنما أعني الدواء الذي يلقي⁴⁴ على الحديد ليظهر له فرند. وإذا قلت السيف أحمر فإنما أعني المجلي الذي لم يطرح عليه الدواء [بعد] فإن الصياقلة تسمى هذا الدواء⁴⁵ الجلاء الأحمر. وإنما استعملت هذه الأسماء لك دون تفسيرها لتعرف معانيها في ألفاظهم لها لئلا⁴⁶ يغيب عنك من أمرها شيء إن شاء الله تعالى⁴⁷ [فلنبدا الآن بصفة ما نريد بعون الله وتأيدده].

³⁶ هكذا في أ. في ل "استوت" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

³⁷ هكذا في أ و ل ولكن يكتب زكي "وفي كل منها موضع أثخن من نظيره".

³⁸ هكذا في أ و ل ولكن يكتب زكي "الصناعات".

³⁹ زيادة عن أ غير مذكورة في زكي.

⁴⁰ هكذا في أ و ل ولكن يكتب زكي "وأما وقد ورد كل نوع منها".

⁴¹ فإن الحديد: أ "فالحديد".

⁴² أعني: أ "وهي".

⁴³ أضيفه: أ "أضيف" (بدون تنقيط كامل).

⁴⁴ وإذا: أ "وإن".

⁴⁵ يكرر ل هنا اللفظة "أعني الدواء" ولكن يحتمل أنه غلطة الكاتب.

⁴⁶ الدواء: أ "الجلاء".

⁴⁷ ألفاظهم لها لئلا: أ "ألفاظهم لأن لا".

⁴⁸ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

useful and most clear. Likewise I shall set out the meanings of this treatise in such a way as will be clearest and simplest for its understanding, even if that were taken out of its order in the sequence that I have given it. As for the qualities of the rest²⁵ of their types, I shall mention them in turn and the qualities of each one of the types of the ancient [as well].

As for the trenchant swords, with respect to their forms (*ashkāl*) rather than to their natures (*jawāhir*), [they] are the ones that are short, if they hve good bodies and their surfaces and thicknesses are equal. [On them there is not a place inside and a place outside]. (14) nor a place thicker than its equivalent. Their blades are course, except the edge (*hadd*) itself, for the edge should be the measure of a hair on each side. These are the most trenchant (aqta^c) of swords in adversity. As for what best cuts clothes and flesh, it is what combines in it all these properties, except for the coarseness, for the thinnest blade is what best cuts flesh and clothes, and it is not praiseworthy if the blades are not thin²⁶. Moderatin of the quenching is an aid to sharpness, for if the quenching is sevre, the blade will be severed in adversity; whereas if it is light, the blade will be strong in adversity.

As regards the shapes (*qudūd*) of every type of sword, we shall mention that once we have mentioned every type by its qualities, for in that is an aid to knowledge of their types. Though it may well be that they resemble each other in shape and also share the component of iron, nevertheless knowledge of these things increases awareness of their types. If the shape conforms to the iron, it is the truest witness; if they differ, then the iron is a truer witness than the shape and more suitable for forming a judgement. Instead of the neme of the watering (*al-firind*) the swordsmiths use the name of the iron (*al-hadīd*), for when it is of apparent watering then they say that it is of apparent iron.

As for the ground (ard) [that is, the ground of the sword], they call it ground according to its condition, that is, the place of the iron with no watering. Thus they say “red of ground”, “green of ground” and “dark of ground”. So when you find me saying in this book of mine “white (15) of iron”, “yellow of iron”, or other descriptions of iron, I am attributing it to the sword and I am only referring to the watering. And if I say “before throwing” or “after throwing”, I am only referring to the medicament (*dawāʿ*) which is cast onto the so that a watering becomes apparent. And if I say the sword is red, I am only referring to the place to be polished on which the medicament has not [yet] been thrown, and so the swordsmiths call this medicament²⁷ the red polish (*al-jilāʾ al-ahmar*). I have not used these names without first explaining them to you so that you know their meanings in their (the swordsmiths’) expressions about them (the swords) so that nothing escapes you of their matter, God Almighty willing. [So let us now begin describing what we wish with God’s aid and support].

[السيف] اليمانية

جوهر [ها أعني فرندها] مستطيل معرج متساوي العقد. ليس بعض العقد أكبر من بعض أبيض الجوهر أحمر الأرض أخضر [الأرض] قبل الطرح. على قدر شبر من سيلانه أنك⁴⁹ صغار دقاق بيض في مثال الدود يتلو بعضه بعضا في [لون ك] بياض الفضة والأنك آثار في السيف بيض مثل [حلقة] الدود.

(16) [و] القد أربع قنود وهي جميع قنود السيف التي طبعت باليمن. منها العريض الأسفل المخروط الرأس المربع السيلان تربيعة مخروطا إلى طرف السيلان. وأكثر ما يكون من علامات سيلانات العتق التي طبعت في الجاهلية ثقبان [قد ثقباً] بالسنبك وثقب السنبك من أحد جهتيه⁵⁰ أوسع أو جهته متساويتان⁵¹ ووسطه أضيق وفيه أربع شطب. منها المحفور وهو الذي شطبه شبيهة بالأنهار مدورة الحفرة⁵² وهو الذي يسمى الابدريكنج ومعناه الموقع فيه الشطب المعمول بالكونزنج ومعنى الكونزنج المبرد المدور الذي يحفر به وهو الذي على ضبع الصمصام⁵³. ومنها الذي شطبه إذا⁵⁴ ذا شكات وهي شطب بزوايا مربعة من داخل الشطب وتكون هذه الشطب متساوية في وجه السيف ويسمى شهادست⁵⁵. ومنها ذو ثلاث⁵⁶ شطب واحدة في الوسط و[ا] ثنتان في الشفرتين وهي التي تسمى داست⁵⁷ وهذه تسمية الجاهلية.

(17) وأشكال هذه على ما قد صورنا⁵⁸ وعلى هذا الشكل صورة الصمصام⁵⁹ وأكثر ما يكون منها عرض ثلاث⁶⁰ أصابع تامة وأقل ما يكون منها [عرض] إصبعين ونصف وهي الخفاف. منها القبورية⁶¹ [التي لا يوجد منها]⁶² أكثر من رطلين أو رطلين غير ربع. وهذه⁶³ الخفاف القبورية تكون سواذج لا شطب فيها مختلفة في الطول ما بين الثلاثة الأشبار وأربع أصابع إلى أربعة أشبار وإنما أقروها على هذا الطول مخافة أن تنقص أوزانها.

49 تكتب هذه الكلمة في اثنين غير منقطعين بين الألف والكاف.

50 هكذا في أ. في ل "جهتيه" (بدون تنقيط) ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

51 في أ و ل: "في الجاهلية ثقبين... أو جهتيه متساويتين".

52 منها المحفور... مدورة الحفرة: أ "ومنها المحفورة... بمدورة الحفر".

53 الصمصام: أ "الصمصامة".

54 هذه الكلمة غير موجودة في أ.

55 شهادست: أ "سهاداس".

56 في أ و ل: "ثلاثة".

57 داست: أ "سهادست".

58 صورنا: أ "وصفا".

59 نرجد الجملة "وعلى هذا الشكل صورة الصمصام" ورسم السيف الذي يليها في ل فقط.

60 في أ و ل: "ثلاثة".

61 هكذا في أ و ل ولكن يكتب زكي "القبورية" نسبة إلى مدينة في الأندلس مشهورة بسيفها.

62 تكرّر ل هذا اللفظة "تكون سواذج لا شطب فيها" التي ترد في أسطر التالي.

63 وهذه أ "وهي".

The Yemeni swords

Their nature, [that is, their watering], is elongated, curved, of equal knotting, there is no knot bigger than another, white of nature, red of ground, green [of ground] before throwing. At the measure of a span from its tang (*sīlān*) are small, fine white bits of lead (*ānuk*), similar to worms, that follow one another, with [a colour like] the white of silver; that is, the lead leaves traces in the sword white like [a chain of] worms.

(16) [Now] there are four shapes and these constitute all the shapes of the sword that are forged in Yemen. The first are those that are broad at the bottom, tapering at the top, its tang very square, tapering towards the end of the tang (*taraf al-sīlān*). Now the most common mark of the tangs of antiquity that were forged in pre-Islamic times is two incisions (*thaqabān*) [incised] at the extremity (*sunbuk*)²⁸, these incisions may be broader in one direction or the two directions may be equal and the middle narrower. This type of sword has four grooves (*shutab*). Secondly there is the carved-out sword (*al-mahfūr*), the grooves of which are similar to rivers, circular²⁹ as to the carving. It is called the *abdrykndj*³⁰, which refers to the place where the grooves are made with the *kūnaznāz*, which means the circular file which is used for carving out, and it is after the fashion of the *samsāma*³¹. Thirdly there is the sword with grooves possessing piercings (*shakkāt*), that is, grooves with square angles within them. Such grooves are evenly arranged on the face of the sword. *Shahādāst*³² is the name of these swords. Finally there are the swords with three grooves, one in the middle and two in the two blades, and they are called *dāst*³³, and this is the pre-Islamic appellation.

(17) The forms of these swords are in accordance with what we have already depicted, and of this form is the enclosed drawing of the *samsāma* sword³⁴. The most they can be in breadth is a full three fingers and the least they can be [in breadth] is two and a half fingers, and these are light swords. Among them is the Qabūriyya³⁵.

فأما العراض فيكون طولها ثلاثة أشبار ونصف وتكون أوزانها ما بين الرطلين ونصف إلى ثلاثة أرطال غير ربع. والذي فيه منها ثلاثة⁶⁴ غير ربع (18) مضطربة القدود شديدة الالتواء وإنما تترك مضطربة مخافة أن تدخل النار فتتقص أوزانها وإنما أثمانها بأوزانها.

ولا تكاد [أن] تسلم اليمانية من العروق [المفتوحة والعرق] المفتوح هو الذي به مواد أي البوست وهو القشر. وقد توضع على العروق التماثيل لتخفي وتكتب عليها الأسماء لتخفي آثارها. وكل كتاب يصاب في سيف أسفل من السيلان [ب] أكثر من أربع أصابع مضمومة بالعرض فهو على كسر [إن] كان خطأ دقيقاً وإن كان خطأ غليظاً فهو على عرق. ومتى أصبت في سيف مثال رجل أو حيوان تاماً مذهباً فهو على شيء في السيف يسمى الكياكن وهو فسخ وتقرز من الحديد⁶⁵ وهو ينكسر من ذلك الموضع.

وإذا رأيت [في] الحديد اليماني شبيها بالصبيان نقب وهو في أبيضها حديد إلا أن أبيضه أبيضه وهو يسمى سبوسك أي⁶⁶ النخالة فإنه يابس ينكسر (19) [و] حديده إذا جلوته أحمر من غير دواء⁶⁷. فإنه كثير العقد جداً صبيح أصبح اليمانية⁶⁸ على الجلاء الأحمر. وهو مما يخاف عليه أن يضرب به في اليوم البارد فينكسر وهذا [الذي وصفنا] لا يصاب إلا في اليمانية العتق⁶⁹ القبورية. ومنها ما يوجد في صدره⁷⁰ الماسات والماس هو العرق اللين الذي لا يكون فيه فرند. ولم ير من يختار⁷¹ من الصياقلة سيفاً في عرقه فرند إلا الصمصامة من العتق.

فأما المولدة [البصرية] فموجود ذلك فيها [كلها وإنما يكون العرق فيها] لأن الدواء الذي يطرح على⁷² الحديد ليصير فولاذاً لا يمتزج بالحديد كله على استواء فيبقى⁷³ فيها مواضع نرمالين لا فرند فيه. فإذا ضربت يجلس بعضها على بعض فصار الفرند في داخلها خفياً. ومنها ما قد دخل عليه الماء من البطنين فيكون شبيها بالعرق وليس بالعرق⁷⁴ أحمر كالسقي فقسها إلى⁷⁵ السقي في شفرة السيف⁷⁶.

⁶⁴ والذي فيه منها ثلاثة: 1 "والذي فيها ثلاثة أرطال".

⁶⁵ يكتب زكي "وهو فسح ويعود من الحديد" ولكنه غير معقول.

⁶⁶ أي: 1 "ومعناه".

⁶⁷ كل هذه الجملة غير واضحة في المخطوطتين. يغير زكي ترتيبها بدون أي شرح.

⁶⁸ هكذا في 1 ولكن يكتب زكي "صبح أصبح اليمانية".

⁶⁹ هنا وفي أمكنة أخرى في المخطوطتين يحل الاسم "العتق" محل التعت "العتيق".

⁷⁰ هكذا في 1 ولكن يكتب زكي "صورة".

⁷¹ من يختار: 1 "أهل البحث".

⁷² هكذا في 1. في ل "عليه" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

⁷³ هذه الكلمة موجودة في 1 ولكنها غير موجودة في زكي.

⁷⁴ الكلمات "وليس بالعرق" غير موجودة في 1.

⁷⁵ هكذا في 1 ولكن يكتب زكي "شبيها إلى".

⁷⁶ السقي في شفرة السيف: 1 "السقي الذي سقوه السيف".

[which are not found to be] more than two ratls or even two ratls less a quarter. These light Qabūriyya swords are plain, without incisions on them, varying in length between three spans and four fingers to four spans and they have fixed them at this length for fear that their weights might be deficient. As for the broad ones, their length is three spans and a half, and their weight lies between two ratls and a half and three ratls less a quarter. Those that are three less a quarter **(18)** are misshapen and very crooked, but they are left misshapen for fear that if they are put in the fire their weights will be reduced, for their prices are determined only by their weights.

It rarely happens [that] Yemeni swords are free from veins [which are open, and the vein that is] open is the one with black in it, that is, *al-būst*, which is the crust³⁶. On the veins are placed images so that they are hidden, and also names are written on them so that their traces are hidden. Any writing is situated on a sword at a point lower than the tang by more than four fingers pressed together crosswise. [If] the handwriting is fine it is put over a crack, if the hand is rough it is put over a vein. When a human or animal image, completely of gold, is to be affixed to the sword, it will be located on a thing in the sword called the *kayākin*³⁷, (which is where there occurs) splitting and separation³⁸ of the iron, and it may break at that place.

If you see [on] the iron of the Yemeni the like of ridges, then it pierces well, and in its white part it is sharp, unless its white part is very dry; and it is called *sabūsak*, [which means] the refuse (*al-nukhāla*)³⁹, for it is dry, liable to break **(19)**⁴⁰. And its iron, if you polish it, is red without medicament, and it has very many knots, handsome as the handsomest⁴¹ Yemeni of red polish. Its use on a cold day is feared lest it breaks, and this [that we have described] is only encountered with the ancient Yemeni Qabūriyya. Some of them are to be found with *mās* on their forepart, and the *mās* are pliable veins which have no watering in them. The discerning swordsmith will not have seen a sword with watering in its vein except for the ancient *samsāma*.

As for the indigenous [Basran] swords, that is also present in them [fully. And the vein is only in them] because the medicament that is thrown on the iron so that it becomes steel does not mix evenly with all the iron, and so there remain in them places of soft iron without watering. And when they are struck, a part sits on a part and the watering inside them becomes hidden. Among them there are some that have water enter them from the inner halves (*al-batnayn*), and it resembles the vein but is

وكل العروق البيض اللينة فهي الماسات والعروق لا تضر السيف شيئا⁷⁷ إلا ما كان على الحد⁷⁸ فإنه لا يشرب الماء ولا يقطع سيفه أبدا. والعروق الخفية في نوكات⁷⁹ في الحديد فأما الماس فهو ما صغر منها. وإنما يكون الماس قدر إصبعين أو نحو ذلك فأما الكبير فهو عرق لا محالة. وكل عرق أو ماس يكون (20) فوق المضرب إلى القائم بقدر إصبعين فإنه لا يضر السيف [شيئا]⁸⁰ والمضرب على قدر شبر من الذباب وقد أمن صاحب السيف الذي فيه العروق الماسات الكسر في اليوم البارد لأنه إنما يخاف على العتيق في اليوم البارد - ومن اليمانية الموصول السنان⁸¹ ومنها الموصول الصدر.

وذلك إنما يكون من الضرب بالسيف⁸² فيقطع لا لرداءة حديد وليس⁸³ لسقي دخل عليه من البطنين فإن كل موضع يشرب الماء ييبس وإنما يصير على الشفرتين ليبس القطع. وإذا صار إليك سيف فرأيت حديدته في موضع السقي شديد الحمرة شبيها بشعل النار وأمرت يدك على الشفرتين فوجدته شديد اللين لا يعرض الكف فلا تقدم به على قتال ولا حرب فإنه لا يقطع كثيرا ولا قليلا. وإن [ضربت به و] أصاب موضع حديد انبثرت شفرته وإن قل ذلك وافته شدة السقي⁸⁴. فعلاجه حتى يصلح أن يؤتى⁸⁵ رماد الحمام بعد أن تأتي على الرماد ساعات من النهار وتلين ناره فيدس السيف في الرماد ويتعاهد بالنظر. فإذا صار طاووسي اللون وضع على شفرته من الزيت [شيء] وترك حتى يبرد في موضع لا يصيبه الماء ولا الريح (21) فإنه إن أصابته الريح اعوج ولم يؤمن عليه الكسر. فإنه بعد هذا العلاج يقطع ويؤمن عليه الكسر بإذن الله تعالى⁸⁶.

وقد يكون مما طبع باليمن ما له شطب دقاق [و] كثيرة وما له شطبة واحدة والخريشة⁸⁷ وسواذج غير خريشة. طولها أربعة أشبار وأكثر وأقلها وعرضها أربع أصابع وأقل وأكثر⁸⁸ وليس حديدتها يمانيا⁸⁹ بل سلماني وسرنديبي وهندي. وبعضها مستوية القدود وأعاليتها وأسافلها في عرض واحد. وهذه تعد في العتيق وأوزان هذه ما بين رطلين إلى الخمسة الأبطال إلا أن الصياقلة يكونون عن اسم العتيق فيسمونها لا مولد سلماني سرنديبي.

⁷⁷ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

⁷⁸ هكذا في أ وهو أقل من قراءة ل: "الحديد".

⁷⁹ في نوكات: أ "هي نوكتز".

⁸⁰ في أ: "شيء".

⁸¹ السنان: أ "السلان".

⁸² الضرب بالسيف: أ "المطرق بالسيف" (ولكنه غير واضح).

⁸³ وليس: أ "ولكن".

⁸⁴ وإن قل ذلك وافته شدة السقي: أ "وإن قل الحديد وافته في ذلك شدة السقي".

⁸⁵ هكذا في أ وهو أقل من قراءة ل: "أن يوفي به" وفي زكي "يوتز".

⁸⁶ الكلمات "بإذن الله تعالى" غير موجودة في أ.

⁸⁷ الخريشة: أ "خريشة الطبع". أو يمكن أن العوالب "خريشته".

⁸⁸ الكلمات "وعرضها أربع أصابع وأقل وأكثر" غير موجودة في أ.

⁸⁹ في أ ول: "يماني".

not the vein, red as the quenching, so compare it⁴² to the quenching in the blade of the sword. And all the white pliable veins are *mās*, and the veins do not harm the sword at all except for what is on the edge⁴³, for it does not drink water and the sword with it does/is not cut, and the hidden veins are on the ends⁴⁴ of the blade. The *mās* is the small one of the veins and it has only a measure of two fingers or about that. As for the big one, that is definitely a vein. And every *mās* or vein is above **(20)** the striking-spot (*midrab*)⁴⁵ towards the handle (*qā'im*) by a measure of two fingers, and it does not damage the sword [at all], and the striking-spot is at one span from the sharp edge of the tip (*dhubāb*). The owner of a sword with *mās* veins in it is guaranteed against it breaking on a cold day, for it is only to be feared of the ancient ones on a cold day and among the Yemeni swords there are some with joined iron head (*sinān*)⁴⁶ and some with joined forepart (*sadr*).

That (breaking on a cold day) is only from striking with the sword with the result that it is severed, not because of the badness of the iron and not because of⁴⁷ the quenching that has entered through to the inner halves, for every place that takes in water is dry, and it only befalls the blades because of the dryness of the cut. If you get a sword and you see its iron on the place of the quenching is very red, resembling flames of a fire, and you let your hand pass over the blades and you find it extremely pliable and not biting into the palm of the hand, then do not proceed with it to battle or to war, for it cuts neither much nor little. And if [you strike with the sword and] it hits a place of iron, the blade will be severed. And if it is blunt, in that case severity of quenching has brought it about. The treatment to rectify it is to have the ashes of charcoal brought after hours of the day have gone over these ashes and have tempered its fire, and then insert the sword in the sword in the ashes and pay close attention to it. When it goes a peacocky colour [some] oil should be put the two blades, and then left until it is cooled off in a place where neither water nor wind can reach it, **(21)** because if it is affected by wind it will become crooked and it will not be guaranteed against breaking. After this treatment it will cut and be guaranteed against breaking [God willing].

Among those forged in Yemen there may be some with many thin grooves and some with a single groove, and both filed⁴⁸ and unfilled plain ones. Their length is four spans, or a bit more or less, and their breadth is about four fingers, or a bit more or less. Their iron is not Yemeni, but Salmāni, Sri Lankan and Indian. And some of them

وليس العتيق إلا القلعي واليماني والهندي هو الفقرون وأكثر ما يكون من الفقرون وزنا خمسة أرتال وهي السيوف الأول اعني الفقرون خاصة. وجوهر الفقرون يشبه جوهر اليماني أو القلعي فبذلك الجنس يسمى. وهي التي تسمى المعتوقة إذا غيرت إلى القلعي أو إلى اليماني. فمن خالفه أو ادعى أنه يقدر على يمان فيه ثلاثة أرتال أثيناها سيف من هذه القيورية الصغار فقسناها إلى ما جاء به فإن شاكله فهو صادق وهذا غير موجود. (22) وأكثر ما يكون⁹⁰ من السلمانية الصغار [و]القلعية الدقاق تطيع ويغير قدها إلى اليمانية وتباع على أنها يمانية. ومن هذه السلمانية ما يكبس ويعمل بالمنقاش. فيبقى رسم ذلك النقش فريدا وهو الذي يصادف عقده بقسمة معمولة ويبيع على أنه يمانى. وربما طبعوا القلعية في قد اليمانية فباعوها ب[حساب] اليمانية لأن القلعي إذا كان فيه ثلاثة أرتال غير ربع ساوى عشرة دنانير إلى خمسة عشر [دينارا] على قدر القد والصباحية⁹¹ وإن كان عرقا أي فيه عروق يساوي خمسة دنانير فإذا كان يمانيا في هذا الوزن والصباحية ساوى ما بين الخمسين دينار⁹² إلى المائة (23).

القلعية

وليس في السيوف القلعية [ما عرضه] أربع أصابع ولا ثلاث تامة إلا معمولة ويكون [طولها] ما بين الأربعة الأشبار إلى الخمسة أشبار إلا ما قصر فعولج. وقودها قدود مستوية. أعاليها وأسافلها واحدة [وهي] أدق [سيلانات] من سيلانات اليمانية⁹³ ومكاسرها ومكاسر اليماني كالفضة البيضاء. فأما المعمولة منها عملا ثانيا من غير سبك فيوجد على كل طبع إلا أنه لا يكون منها مشطب. وهي أصغر فرندا من اليماني [وأكثر تعقيد جوهر من اليماني] وأشد اختلاف عقد [و]ليست بمتساوية في العظم وأشد حمرة جوهر وأرض. ولا يوجد منها سيف يابس وتوجد نقيّة الحدود⁹⁴ من العروق (24).

⁹⁰ يكون: أ "يباع".

⁹¹ الصباحية: أ "الصباحة".

⁹² في أول: "دينار".

⁹³ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "واحدة أدق [وهي] من [سيلانات] سيلات اليمانية".

⁹⁴ الحدود: أ "الحديد".

have an even shape, their highest and their lowest part of one breadth. These were prepared in antiquity and their weight lies between two and five ratls, however the swordsmiths refrained from the name of ancient and called them foreign Salmāni and Sri Lankan.

The ancient swords only comprise the Qala^{ci}, the Yemeni and the Indian, the latter being the *fāqirūn*. The most the *fāqirūn* can be in weight is five ratls, and they, that is, the *fāqirūn* in particular, are the first swords. The nature of the *fāqirūn* resembles the nature of the Yemeni and the Qala^{ci}, and thus is the genus named. They are the ones called made ancient if they are changed to the Qala^{ci} or to the Yemeni. And whoever contradicts this or who claims to have a Yemeni of three ratls, we will bring him a sword of these small Qabūriyya and measure it against what he brought us, and if it resembles it then he is right, but that would never happen. (22) And most of the small Salmāni and the delicate Qala^{ci} swords are forged and then their shape is changed to a Yemeni, and they are sold on the basis that they are Yemeni swords.

Among those Salmānis are some that are pressed (*yukbas*) and worked with an engraving tool (*minqāsh*, and the imprint of that engraving remains unique. And this is the one whose knotting is found in evenly-worked portions and it is sold on the basis that it is a Yemeni. Sometimes they forged the Qala^{ci} in the shape of the Yemeni and sold it [for the consideration of] a Yemeni, because the Qala^{ci} if it is three ratls less a quarter equals ten dinars to fifteen [dinars] depending on the shape and the broadness of the tip (*subāhiyya*)⁴⁹. If there are any veins in it, it equals five dinars, whereas if it is a Yemeni with this weight and broadness of tip it will equal anything between fifty and a hundred dinars (23).

The Qala^{ci} swords

Qala^{ci} swords only have [a breadth of] four or three fingers in total if they are worked, and their length is between four and five spans, except for those which have been reduced and have been treated. They have an even shape, their highest and their lowest parts are one; [they] are delicate in their [tang], more than in the tangs of the Yemeni, and their fracture surfaces (*makāsīr*), as those of the Yemeni, are like white silver. As for those worked a second time without melting (*sabk*), they are found according to every fashion though none of them have grooves. They have a smaller watering than the Yemeni [and a more knotted nature than the Yemeni], as well as the greatest diversity of knots. [And] they are not even in size, they have the reddest nature and ground; there is not a dry sword among them, and their edges⁵⁰ are free of veins (24).

الهندية

والهندية جوهرها شبيه بجوهر اليماني إلا أن جوهرها يضرب إلى السواد [ومكاسرها تضرب إلى السواد] ويقع من المولدة ما جاء من⁹⁵ خراسان أجناس⁹⁶ تدخل في القلعي واليماني جميعا. [الهندية في قنود القلعية] فإذا رأيت منها سيفاً في قد القلعي أشد تعقداً من القلعي وأكثر تعجراً - أعني بالتعجر تداخل الفرند بعرضه في بعض - فوجدته يضرب إلى السواد ووجدت الحديد مختلفاً في الفرند من أوله إلى آخره موضع فرند صغار و⁹⁷ موضع فرند كبار ووجدت الفرند الذي على الموضع الذي⁹⁸ يتركه الصياقلة ولا يسقونه وهو قدر شبر وأكثر مما يلي السيلان فرند صغار مبين⁹⁹ يشبه بالسلم فاعلم أنه مولد. فاجل منه قطعة حمراء فإنك [ترى] تخرج الزيت من تحت المصقلة أسود وترى للمصقلة أثراً [فيه] كآثر المصقلة في الرصاص وترى القطعة نفسها الحمراء [التي جلوتها] لا جوهر فيها وتبين آثار المصقلة فيها [وإن] خفي. وتنتظر إلى الآنك الذي وصفت لك في صدر هذا¹⁰⁰ الكتاب وهو الذي [قلت إنه] شبيه بالدود الذي¹⁰¹ يتلو بعرضه بعضاً فإنك تصيبها¹⁰² في العتيق ببيضاء نقية وتكون هذه كمدة تضرب (25) إلى السواد. [وتجد] حد كل سيف منها¹⁰³ [إذا] تمر يدك عليه خشناً¹⁰⁴ لا كالعتيق ف[حينئذ] قسه إلى العتيق وهذه [الأشياء] التي وصفنا إمارات المولدة.

وأما اليمانية العتق والقلعية العتق فيخرج حمأها وتوبالها أحمر يشبه النحاس والهندية يخرج حمأها وتوبالها [أحمر فيه سواد والمولدة يخرج حمأها وتوبالها] ومكاسرها مثل الرماد أسود والزيت¹⁰⁵ يخرج من تحت مداوس المولدة أسود. فأما من تحت مداوس اليماني والقلعي [العتيق] فوسخ قليل وكذلك الهندية [أيضاً] شبيهة بنقاء اليمانية والقلعية¹⁰⁶.

⁹⁵ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "في".

⁹⁶ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "وأجناس".

⁹⁷ الكلمات "موضع فرند صغار و" غير موجودة في أ.

⁹⁸ الكلمات "على الموضع الذي" غير موجودة في أ.

⁹⁹ هذا الاقتراح ولكن في أول "ميت" (بدون تنقيط) وفي زكي "م".

¹⁰⁰ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹⁰¹ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹⁰² تصيبها: "تصيب هذا الآنك".

¹⁰³ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "تصيب".

¹⁰⁴ في أول: "خش".

¹⁰⁵ يقول زكي أن المصواب "الزيت" بدون أي شرح.

¹⁰⁶ شبيهة بنقاء اليمانية والقلعية: "شبيهة في النقاء باليمانية والقلعية".

The Indian swords

The nature of the Indian swords resembles that of the Yemeni except that their nature inclines to black [as also do their fracture surfaces]. And there are some kinds of the indigenous that come from Khurasan which encroach upon the Qala^ci and the Yemeni totally. [The Indian swords can be in the shapes of the Qala^ci]. So if you see among them a sword in the shape of a Qala^ci, with a more intense knotting than the Qala^ci and more wrinkling (*ta^cajjur*) – by wrinkling I mean interpretation of the watering – and you find it inclining to black and you find the iron different in the watering from bottom to top, whether the place of the watering is small or it is big, and if you find the watering which is on the place that the swordsmiths leave and do not quench and which is a span or more from what adjoins the tang, to be small, clear⁵¹, resembling a ladder, then know that this is an indigenous sword. Polish a red piece of it and [you will see that] the oil comes out black from under the polishing tool (*misqala*), and you will see pertaining to the polishing tool a trace [on it] like the trace left on the polishing tool by tin. And you will see that the same red piece [which you have polished] has no nature on it and that traces of the polishing tool appear on it, [even if] hidden. You should look at the lead (*ānuk*), which I described for you at the beginning of this treatise. It is that which [I said that it] resembles worms which are following one another, and you will come across it (this lead) in the ancient as pure white, but in this one it is like a substance inclining (25) to black. [And you will find] the edge (*hadd*) of every sword among them, [if] you let your hand pass over it, is rough not like the ancient. [Then] compare it to the ancient and you will see that these [things] that we have described are the characteristics of the indigenous sword.

As for the ancient Yemeni and the ancient Qala^ci swords their slag and hammer-scale come out red resembling copper. The slag and hammer-scale of the Indian swords come out [red with black in , and the indigenous sword's slag, hammer-scale], and fracture surfaces come out black like ashes, and the oil⁵² comes out black from under the grinding tools (*midāwis*) of the indigenous. As for what emerges from under the grinding tools of the [ancient] Yemeni and the Qala^ci, it is a little bit dirty, and the Indian likewise [also] resembles the purity of the Yemeni and the Qala^ci.

السلمانية

فأما [السيوف] السلمانية فإن منها جنسا يسمى السلمانية الصغار وهي سيوف لطاف العروض طوال قصار الفرند فيها بعض الجعودة (26) وشبيهة بجعودة القلعية ظواهر الجوهر من غير طرح. وهي ما حمل حديدتها مسبوكة من أرض سلمان إلى وراء النهر من خراسان فطبعت هناك وقودها قدود دقاق القلعية. فإذا وقع منها سيف جيد الوزن أخذته الصياقلة الحكماء منهم فأدخلوه النار ثم كبسوه حتى يدخل بعضه في بعض ثم يطبع بعد أن يقصر طوله بقدر شبر ليزيد في عرضه¹⁰⁷. فإن أحبوا أن يشبهوه باليمانية قصروه وخرطوا رأسه على شكل ما وصفنا من اليمانية. ثم سقوا نصفه ليعصم¹⁰⁸ جوهرها لم يشرب الماء منه ويضرب إلى البياض بعد الطرح ويحمل¹⁰⁹ النصف الأعلى مما يلي الذباب من أجل السقي. فإن¹¹⁰ اليمانية العتق على هذا المثال تكون في سقيها إلا ما لأن حديدتها منها واسترخى من اليمانية وغيرها من الشبه بها فإنهم يسقونه [كله] إلا شبرا [منه] أو أقل منه¹¹¹ مما يلي السيلان. وإن أرادوا أن يطبعوها في قد القلعية عملوها سيوفا طوالا [طولها] أربعة أشبار غير أصبعين متساوية الطرفين ملسنة الرؤوس وهذا الصنف¹¹² من هذه السيوف السلمانية التي ننسبها (27) إلى هذا الاسم من الصغار يجوز في هذين البابين إذا خولف طبعها وجوهرها إذا جلي احمر و[لذلك] نجد فرنده¹¹³ أحمر ظاهرا بينما يكون الفرند¹¹⁴ منه واحدة ونصفا من¹¹⁵ فرند القلعي وأكثر من فرند¹¹⁶ اليماني قليلا¹¹⁷. ويرى فرنده بعد الطلي¹¹⁸ كالأنوبة المكسورة غير متصلة بعضها في بعض في مواضع عدة من الكبس [لأن] ليس في كله مختلف الوجهين لحال كبس المطارق. ومنها السلمانية العراض وهي التي تدعى البهانج¹¹⁹ والبهانج¹²⁰ العريض وعرضها ما بين ثلاث أصابع إلى أربع أصابع وطولها أربعة أشبار. وتكون أوزانها ما بين الثلاثة الأرطال إلى الثلاثة ونصف.

ومنها الجنس الذي يسمى الرثوث وهي قلما توجد إلا وعلى سيلانها¹²¹ طابع مربع فيه اسم الصانع الذي صنعه على قدر إصبعين مضمومتين من¹²² طرف السيلان.

107 عرضة: أ "طوله".

108 هذا اقتراح. في أول "يعظم" ولكن هذا غير معقول. يكتب زكي "لينظم".

109 يحمل: أ "يحمي".

110 فإن: أ "لأن".

111 أقل منه: أ "أقل من شبر".

112 هكذا في أ. في ل "النصف" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

113 هكذا في أ. في ل "حدث فرده" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

114 يكون الفرند: أ "يكون الفرند". ويحذف زكي "يكون" ويكتب "الفرنية".

115 هكذا في أ ول ولكن يكتب زكي "في".

116 في أ ول "فرنده" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

117 هذه الكلمة غير موجودة في أ.

118 الطلي: أ "الطرح".

119 يكتب هنا في أ ول "البهك" ولكنه يعني بلا شك "البهانج" المذكور في بداية الرسالة.

120 والبهانج: أ "وهو".

121 وهي قلما توجد إلا وعلى سيلانها: أ "وهي أقل ما يوجد إلا وعلى سيلانها".

122 هكذا في أ ول ولكن يكتب زكي "في".

The Salmāni⁵³ swords

As for the Salmāni [swords], among them there is a kind called the small Salmāni. They are long swords of fine breadth, long, small watering, with some curliness, (26) resembling the curliness of the Qala^ci, their nature apparent without throwing. Their iron is brought cast from the land of salmān⁵⁴ to Transoxamian Khurasan and then they are forged there. Their shapes are the delicate shapes of the Qala^ci. If there occurs among them a sword of excellent weight, the clever ones of the swordsmiths take it, then put it into the fire and they press it until it is completely blended⁵⁵. Then it is forged after its length has been shortened by a span so that it increases its breadth. If they want to make it resemble the Yemeni, they make it shorter and even out its top (*kharatū*)⁵⁶ after the fashion of what we have described for the Yemeni. Then they quench half of it so that its nature is safeguarded (*yu^csam*)⁵⁷ and does not drink water, and it inclines to white after the throwing and the upper half next to the sharp edge of the tip (*dhubāb*) is affected (*yuhmal*)⁵⁸ because of the quenching, for the ancient Yemeni is quenched in this way, except for those with pliable iron, those of the Yemeni that have become slack, and other ones like these. They quench it [all] except for one span [of it] or less than one span of what is next to the tang. If they want to forge it in the shape of the Qala^ci, they work them into long swords [with a length of] four spans less two fingers, with even tips and with pointed heads. And this type of Salmāni swords, to which we have attributed (27) this name of the “small ones”, belongs in these two categories if their forging is light and if their nature, when polished, becomes red. [For that reason] we find its watering red, apparent and clear. The watering of it is one and half times that of the Qala^ci and a little bigger than the watering of the Yemeni. After the coating (*taly*)⁵⁹ its watering looks like a broken shaft (*unbūba*)⁶⁰, discontinuous in numerous places of the pressing, [because] it is not throughout different on the two sides on account of the pressure of the hammers.

And among them are the broad Salmāni swords, which are called the *bahāng* and are broad. Their breadth is between three and four fingers and their length is four spans. Their weight is between three and three and a half ratls.

Among them is the kind called the *rathūth*. These ones are seldom to be found without a square stamp (*tābi^c*) on their tang with the name of the manufacturer on it at a measure of two fingers compressed together from the end of the tang. The best of

وأجودها ما كان كتاب طابعه قد انحكم¹²³ في طابع [مربع]. وذكر من أدركت من الصياقلة أنهم لم يروا شقا¹²⁴ عليه قد عمروا بالمنصورة إلا [سيفا] واحدا وهو مفقر الظهر. وبعض (28) هذه الرثوث تكون مفقرة وأكثرها خريشة وطولها أربعة أشبار وعرضها ما بين أربع أصابع مضمومة إلى أقل من أربعة قليل¹²⁵ [جياذ المتون حسان الرؤوس عراض السيلانات [كسيلانات] القلعية الكبار.

وحديدها كلها ظواهر من غير طرح. وإن سقى منها¹²⁵ سيف ماء متن وصلب ثم جلى أحمر ومحي الخاتم الذي على السيلان بالمطرقة اشتراه جميع صياقلة خراسان والموصل واليمن والجنال على أنه قلعي ما خلا العراقيين. وتكون أوزان هذه ما بين أربعة أرتال وأربعة¹²⁶ ونصف وأقلها ثلاثة أرتال ونصف والذي يطبع بسلطان هي عريضة الفرند [ليست] بظاهرة الحديد¹²⁷ أي ليست لها حمرة وهي ارداهما.

السرنديبية

[وأما السيوف السرنديبية ف] ما تطبع بسرنديب وخراسان وقد قدمنا في صدر هذا¹²⁸ الكتاب ما يطبع باليمن. فأما ما يطبع (29) منها بسرنديب فهو [الذي يدعى] النني والنني [هو] الذي لم يحمل¹²⁹ عليه بالنار. وذلك أنهم لا يحمون الحديد¹³⁰ بفحم القصب بل بفحم الخشب اللين وبفحم الخلاف وما أشبهه فيخرج فرنده دقاقا صفرا خفية. فإذا وقع في أيدي البغداديين فأحبوا أن يظهرها جوهرة مرجوه ومعنى مرجوه وضعوه في رماد الحمام الحار حتى لا يبقى فيه من السقي إلا الخفي¹³¹. ثم يجلى ويلقى عليه [الدواء] فإن خرج فرنده جيدا وإلا سموه الأطلس والأطلس الذي لا¹³² ينبل¹³³ جوهرة ولا يعرض ويكون لونه مظلما يضرب إلى الصفرة. وما طبع منه بخراسان فأنهم يطبعونه بفحم البلوط أو بفحم الغضا. وهما جميعا يأخذان من¹³⁴ الحديد أخذا شديدا فيكون¹³⁵ أظهر جوهرا شبيها بالبيض. وأقطع هذه الأجناس التي نسبنا [ها] إلى السرنديب النني.

¹²³ هذا اقتراحي. في أول (وزكي) "الحكم" ولكنه غير معقول.

¹²⁴ شقا: "سيفا".

¹²⁵ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "منا".

¹²⁶ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹²⁷ هكذا في أ وهو أغفل من قراءة ل: "الحدي".

¹²⁸ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹²⁹ هكذا في أ وهو أغفل من قراءة ل: "لا يحمي".

¹³⁰ هذه الكلمة موجودة في أول ولكنها غير موجودة في زكي.

¹³¹ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "الحصن".

¹³² هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹³³ هذه الكلمة مكتوبة بدون تنقيط ويكتبها زكي "ينبل".

¹³⁴ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "منا".

¹³⁵ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "فيكون له".

them are those where the writing of its stamp is fixed⁶¹ into a [square] stamp. Those swordsmiths whom I have come across report that they have never seen a crack⁶² on them as long as they have lived in Mansūra, except for one [sword], which had a serrated back (*mufaqqar al-zahr*)⁶³. Some (28) of these *rathūth* are serrated and most of them are filed. Their length is four spans and their breadth is between four fingers compressed together and slightly less than four. They have excellent broadsides (*mutūn*), beautiful heads and broad tangs like [the tangs of] the big Qala^ci.

And the iron of all of them is apparent without throwing, and if a sword of them is quenched with water, it becomes solid and firm, then it is polished red and the seal (*khātam*) which is on the tang effaced with the hammer. Subsequently, all the swordsmiths of Khurasan, Mosul (a city in north Iraq), Yemen, and Jibal (a province of western Iran) would buy it assuming it were a Qala^ci, except for the Iraqis. The weight of these is between four and four and a half ratls, but the least of them are three and a half ratls. The one that is forged in Salmān has a broad watering and [un]apparent iron, that is, they have no red, and they are the worst of them.

The Sri Lankan swords

[As for the Sri Lankan swords they are what] are forged in Sri Lanka and Khurasan, and we have already introduced at the beginning of this treatise those that are forged in Yemen. As for those of them that are anufactured (29) in Sri Lanka, they are [the ones called] raw (*nīy*), and the raw is the one not affected (*lam yuhmal^c alayhi*) by the fire. That is because they do not heat the iron with cane charcoal, but with charcoal of flexible wood and with charcoal of willow and the like. Then its watering comes out fine, yellow, hidden. If it fell into the hands of the Baghdadis, they would want to make its watering apparent by the *marjūh* process. And the meaning of *marjūh* is that they place it in the ashes of hot charcoals until nothing of the quenching remains except the hidden part⁶⁴. Then it is polished and [the medicament] thrown onto it. If its watering comes out well, then good; if not, they call it the “worn away” (*al-atlās*); and the “worn away” is the one whose nature is not noble⁶⁵, nor broad, and its colour is dark inclining to yellow. Those forged in Khurasan are forged with charcoal of oak or euphorbia. They both take the iron intensely and so it has the purest nature resembling the white swords. The most trenchant of these kinds are [the ones] that we have linked to the raw Sri Lankan.

ومنها ما يطبع بالمنصورة وهي سيوف قصار دقاق رقاق وعراض. (30) وأكثر عرضها ثلاث أصابع يشبه بعضها بحديد اليماني إلا أنه لا يخلو فرنده من الرقة والهزال. والمنصوري [أضواها وأجلها وكلها تضرب إلى الصفرة ما خلا هذا المنصوري] فإنه أضواها وأنبلها¹³⁶ فرندا وأقلها صفرة. وأرض السرنديبي قبل الطرح حمراء تضرب إلى الغبرة وبعد الطرح أرضه حمراء وفرنده دقاق صفر قليلا وقدود هذه المنصورية قدود اليمانية العتق السواذج التي لاشطب فيها.

ومنها ما كان طبع بفارس فيما مضى قد عمل منها¹³⁷ منقوشة بتمثيل وطرر تسمى شاه فنخشير معناه "الملك في الصيد" مذهب بالذهب. وكذلك صنف من السلمانية طبع بفارس تسمى الخسروانية. فأما السرنديبية السواذج من الفارسية فهي أعرض فرندا من هذه السرنديبية كلها وذلك أن أهل فارس كانوا يملطون البيض لأنفسهم. فأهل سائر هذه البلدان تحمل إليهم الأركازمات¹³⁸ [من الحديد] وهي قطع¹³⁹ مربعة ربعت في الأصل ذراعا ذراعا [وهي تسمى أيضا الشبايط]. (31)

البيض

فأما البيض فصنفان من السيوف: صنف طبع بفارس وصنف طبع بالكوفة في الزمان الأول. وهي سيوف قصار أعرض ما يكون منها [عرضا] ثلاث أصابع إلا أن يكون قد وقع في أحدها فل فاخرج الفل فرق. وطولها ثلاثة أشبار وأربع أصابع [مفتوحة أعنى] مفرجة [كذلك] كلها. وسيلاناتها دقاق أعاليها أدق قليلا رقاق وثقب سيلانها ثقبان ثقبان بالسنبك. ورؤوسها أثقل من أسافلها [أعنى بأسافلها] ما يلي القانم. ورؤوسها إلى التدوير ملسنة دقاق الأطراف شبيهة¹⁴⁰ بالأمكنة التي في القلعية غير معقدة مستوي [فرندها] كله. [كوفي عتيق مما طبعه زيد الصانع]. ومنها ما فرنده مشجر كله فإن كان فيه موضع تشجير وموضع غير تشجير فهو مولد. ومنها ما سقايته ما بين¹⁴¹ وما كان كذلك فإن حديده المشجر. فأما ما كان وشاحين على الحد فإنه هو الذي وصفنا في صدر الكتاب.

¹³⁶ هكذا في أ. في ل "أقلها" (مكتوب بدون تنقيط) ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

¹³⁷ هكذا في أ و ل ولكن يكتب زكي "فيها".

¹³⁸ الأركازمات: "الانكاركات".

¹³⁹ هكذا في أ. في ل (وزكي) "قطعية" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

¹⁴⁰ هكذا في أ وهو أصل من قراءة ل "مبتنية" (بدون تنقيط كامل).

¹⁴¹ هذا اقتراعي ولكن في ل "ما بين" وفي أ "هلمين" وفي زكي "مانين".

Among them are those forged in Mansūra, which are short, fine, delicate and broad swords (30). Their breadth is at most three fingers, some of them resembling the iron of the Yemeni except that its watering is not free from thinness and leanness. The Mansūri [is the brightest of swords and the most illustrious. All of them incline to yellow except this Mansūri]; it is the brightest and most noble of them with respect to watering and is the least yellow. The ground of the Sri Lankan before the throwing is red inclining to the colour of dust, and after throwing its ground is red and its watering fine and a little yellow. The shapes of these Mansūri swords are the same as the shapes of the plain ancient Yemenis which have no grooves.

Among them are those forged in Fars in the past, on which engravings of images and ornamental borders (*turar*) are worked that are called *Shah pa-nakhshīr*⁶⁶, which means “the king at hunt”, gilded in gold. And there is also a type of Salmāni forged in Fars which is called the imperial (*Khusrawāniyya*). As for the plain Sri Lankan swords of the Farsi ones, they have the broadest watering of all these Sri Lankan, and that is because the people of Fars were working (*yamtalūn*) the white swords for themselves. The people of the rest of these countries brought nuggets (*arkāziyāt*)⁶⁷ [of iron] to them, which are square pieces, originally a cubit square, [and they are also called *shabābīt*]⁶⁸ (31).

The White swords

As for the white swords they are of two types: a type forged in Fars and a type forged in Kufa in the earliest times. They are short swords, the broadest of which is three fingers [in breadth]. However there may occur in one type of them notching on the edge (*fall*), and the notching brings out a difference. Their length is three spans and four fingers. All of them [likewise] are [open, I mean,] split. Their tangs are slim, their upper parts a little slimmer, thin. Their tangs are pierced twice, two incisions at the extremity (*sunbuk*). Their heads are heavier than their lower parts, [and by lower parts I mean] what is next to the handle. Their heads towards the rounding (*tadwīr*) are tapered, with fine tips (*atrāf*), resembling the places that are in the Qala‘i, not knotted and all [its watering] even. [The ancient Kufan is one which the craftsman Zayd forged]. Among them are those whose watering are all floral (*mushajjar*). If one has a floriated place and an unfloriated place, then it is an indigenous. And among them are those whose quenching is not clear, and those like this have floriated iron. As for those with two bands (*wishāhayn*) on the edge (*hadd*), they are what we have described at the beginning of this treatise.

والبيض الكوفي أقطع من الفارسي و[هي] أقطع السيوف كلها وأصيرها على الكريهة. وبين¹⁴² البيض الكوفي والفارسي إذا تساويا في الوزن والقدر في السيف ثلث الثمن. وعلامة البيض الفارسي أنه أطول من الكوفي بثلاث أصابع وأكثر. فإن أصبته قد غير لعله فاعلم أن سيلانه أطول (32) من سيلان الكوفي التي تسمى الزيدية باصبعين وأثنى وأعرض من سيلان الكوفية¹⁴³ بكثير. وقد تكون هذه الفارسية مختلفة في الرقة والعرض. وهي أعرض جوهرا من جوهر الكوفي إلا أن جوهر الكوفي أصفى وأنور وأشبه بالعقيق الأول. وليس يظهر فرندها إلا بعد الطرح إلا شيئا خفيا¹⁴⁴ جدا وهي زرق الحديد إذا كان غير مطروح عليها [الدواء]. والأزرق هو أبيض يضرب إلى الخضرة. والسيوف الفارسية أسافلها التي تلى السيلان أثقل من أعاليها. وأكثر أثمان الكوفية [منها] الكبار الصباح ثمانية [دنانير] وأقل أثمانها ديناران إلا أن تكون خفيفة الوزن جدا فتباع بدينار.

الفرنجية

[والسيوف] الفرنجية عراض الأسافل. دقاق الرؤوس في قد اليمانية العنق بشطبة واحدة عريضة في وسطها كالنهر الظاهر. وجوهرها شبيه بصنعة¹⁴⁵ غريب الثياب الطبري وتركيب حلق الدرع أبيض الوشي أحمر الأرض بعد الطرح وقبل الطرح لا يظهر منها شيء. [و] في صدورها (33) أهلة محشوة بشبة أو بذهب أو صليب محشو كذلك [بشبة أو ذهب]. ومنها ما¹⁴⁶ في أحد تركيبه ثقب قد عمل¹⁴⁷ فيه مسمار ذهب أو شبة¹⁴⁸. وربما كان ذلك المسمار في اليمانية العدلي¹⁴⁹ مسمورا أيضا بالذهب في تركيبه أو طرفه. وله حدبة¹⁵⁰ تشبه الداسكتين مما يلي الشطبة لا يخرج فيه فرند. والشطبة مقصرة عن طرف الذباب بقدر ثلاث أصابع وأقل. وله شبيه بالثقب¹⁵¹ في [تلك] الثلاث أصابع [وفي تلك الثلاث أصابع] لا يظهر لها فرند وهي أخرط رؤوسا من اليمانية.

¹⁴² هكذا في أوهر أعقل من قراءة "من".

¹⁴³ الجملة "التي تسمى... سيلان الكوفية" غير موجودة في.

¹⁴⁴ في أول "شيء خفي".

¹⁴⁵ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "بصفة".

¹⁴⁶ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹⁴⁷ عمل: أ "سمر".

¹⁴⁸ هكذا في أ. في ل "شبهه" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

¹⁴⁹ العدلي: أ "العنق".

¹⁵⁰ هكذا في أ ويبدو أنه أخط من قراءة ل: "وله حدبة".

¹⁵¹ بالثقب: أ "بالثقب" (بشور للثقب).

The Kufan white swords are more trenchant than the Farsi, and indeed [they] are the most trenchant of all swords and the most enduring of them in adversity. Between the Kufan white and the Farsi swords, even when their weight and shape are equal, (there is a difference) in price of a third. The mark of the Farsi white is that it is longer than the Kufan by three fingers and more. If you obtain one which has been changed for some reason, then know that its tang is longer (32) than the tang of the Kufan called the Zaydiyya by two fingers, and thicker and broader than the tang of the Kufan by a lot. These Farsi swords may be different in fineness and breadth. They have a broader nature than the nature of the Kufan, though the nature of the Kufan is purer, more luminous and resembles more the original ancient. Their watering only appears after the throwing except for a very hidden part. They are blue of iron if there has not been thrown on them [the medicament]. The blue one is white inclining to greenness. The lower parts of Farsi swords, which lie next to the tang, are heavier than their upper parts. The highest price of the large, beautiful Kufans [among them] is eight [dinars] and the lowest price is two dinars, though if they are very light in weight they are sold for one dinar.

The Frankish swords

The Frankish swords have broad lower parts, fine heads, in the shape of the ancient Yemeni with one broad groove in its middle like a clear river. Their nature resembles the character of the foreign Tabari clothes⁶⁹ and the structure of the rings of armour; they are white of ornamentation, red of ground after throwing, and before throwing nothing of it appears. [And] on their foreparts (33) are crescent moons filled with yellow copper (*shabba*) or gold, or a cross likewise filled [with yellow copper or gold]. And among them are some that have an incision in one part of their structure into which a nail of gold or yellow copper has been worked. Sometimes in the most well-formed⁷⁰ Yemeni swords that nail was also nailed with gold into its structure or tip (*tarkībihi aw tarāfihi*). It has a curvature⁷¹ resembling the *dāsaktayn*⁷² in the part next to the groove, and no watering comes out in it. The groove stops short of the end of the sharp edge of the tip (*taraf al-dhubāb*) by three fingers and less. There is the like of an incision in [those] three fingers, and [in those three fingers] there is no watering apparent. Their heads are more tapering than those of the Yemeni.

السليمانية

فأما [السيوف] السليمانية فإن حديدتها على مثال حديد الفرنجي إلا أنه أصغر وشيا وأجلى وأغرب صنعة. وأول السيف وآخره مستويان¹⁵² ليس بمخروط. فإن دق الرأس عن الأسفل فقليل ما. وليس فيه تمثال ولا صليب. وسيلاناتها تشبه سيلانات اليمانية. وكذلك سيلانات الفرنجية [إلا أن الفرنجية] أوفر سيلانات وجميع معانيها سواء.

المولدة

وأما [ما] سوى ما وصفنا فالمولدة وهي [سيوف] في كل طبع. منها جنس يقال له المحرر وهو ما عمل بخراسان في قد القلعية وهو¹⁵³ معقد عقدا صغارا (34) واحدة إلى جنب صاحبته من أوله إلى آخره يعمل بالمنقاش عملا ثم يداس بالمداس فيستوي فتري [عقده] صفوف بعضها يتلو بعضها يشبه القلعي وحديده أسود. وأعرض ما يكون منه إصبعان ونصف وليس يظهر [جوهرها] إلا بعد الطرح فإن ظهر منها شيء قبل الطرح رأيت حديدا رخوا مظلما بعضه يتلو بعضا وعلاماته أن ثقب سيلانه¹⁵⁴ دقاق ويطلع طبع القلعي وتبلغ أثمانها ثلاثين درهما. ومن المحدثه البصرية ما يظهر حديده قبل الطرح معقد بعقد تشبه جوهر السلمياني جوهر ناعم تتبين لك الرخاوة فيه [مع] سواد وظلمة تتبينها في الشمس أضعاف ما تتبينها في الظل حسن الشفرة تنبو اليد¹⁵⁵ عنها تظهر آثار المصاقل فيها مختلفة القدود من عراض ودقاق وقصار وطوال. لم يطبعها¹⁵⁶ أحد من البصريين إلا [رجل يقال له] سليمان. طبعها سنة خمس وتسعين وقطع العمل سنة مائة وتسعة¹⁵⁷. وهي بعد الطرح تذهب عقدها ويخفي جوهرها. وإنما كانت تحمل (35) إلى الجبال وتباع بسعر اليمانية وكانت تباع بدينارين¹⁵⁸ ونصف. ومنها ما طبع¹⁵⁹ بالبصرة أيضا ما لا يزداد ثمنه على ستة دراهم وأربعة دراهم وهي صغار السيلانات دقاق مضطربة القدود.

¹⁵² في أول: "مستويين".

¹⁵³ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹⁵⁴ وعلامته أن ثقب سيلانه: أ "وعلامتها أن ثقب سيلانها".

¹⁵⁵ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "إليه".

¹⁵⁶ هكذا في أ. في ل "يطهر" ولكن يحتمل أنه تصحيف لأنه غير معقول.

¹⁵⁷ في ل ترد هذه الجملة في السطر التالي وتبدأ "صلها" بدل "طبعها". وهي مكتوبة في أ ب ر ق م.

¹⁵⁸ وكانت تباع بدينارين: أ "وأثمانها دينارين".

¹⁵⁹ هكذا في أول ولكن يكتب زكي "صنع".

The Sulaymānī⁷³ swords

The iron of the Sulaymānī [swords] is like the iron of the Frankish swords, except that it is yellow of ornamentation, more lustrous, and more foreign of manufacture. The first and last part of the sword are even, not tapered. If the head is very fine at the bottom, then it is only slightly watered. There is no image or cross on it. Their tangs resemble the tangs of the Yemeni. Thus also are the tangs of the Frankish swords, except that [the Frankish ones] have more amply endowed tangs and all their good qualities are equal.

The indigenous swords

As for [what] has not yet been described, it is the indigenous, and they are [swords] of every fashion. There is a kind called the liberated (*al-muharrar*), which is the one worked in Khurasan in the shape of the Qala^ci. It has small knots, (34) one next to the other from top to bottom, worked with a chisel, then ground (*yudās*) with a grinding tool so that it becomes even. You will see [its knots] in rows, one following another, resembling the Qala^ci swords, and its iron is black. The broadest it can be is two and a half fingers, and [its nature] only appears after the throwing. If anything of it does appear before the throwing, you will see a supple dark iron, part of it following part. Its distinguishing marks are that the incisions of its tang are fine, it has the same forging as a Qala^ci, and its price can reach thirty dirhams.

Among the indigenous⁷⁴ basran swords are those whose iron appears before throwing, knotted with a knotting resembling the nature of the Salmānī. They have a smooth nature in which suppleness is patent to you, [with] blackness and darkness that is twice as patent in the sun as in the shade, a fine blade which the hand will recoil from⁷⁵. Traces of the polishing tools are apparent on them. They vary in shape, broad and slim, short and long, and none of the Basrans forge them except for [a man called] Sulaymān. He forged them in the year ninety-five (714AD) and stopped this work in the year one hundred and nine (727AD). After the throwing their knots disappear, and their nature is hidden. They were brought (35) to the Jibal and sold at the rate of the Yemeni swords. They were sold for two and a half dinars. Also among them are those forged in Basra, the price of which did not exceed four to six dirhams, and they had small thin tongues and distorted shapes.

The Damascan [swords] are all filed and they are the ones forged in the past. They are very trenchant if they are on their first quenching. They are long, filed in a shape we have already described of the Salmānī forged in Mansūra. Their iron resembles the

[والسيوف] الدمشقية كلها خريشة وهي ما ضبعت فيما مضى. وهي قواطع جدا إذا كانت على سقاية [ها] الأولى. وهي طوال خريشته في قد ما وصفت من السلمانية التي تطبع بالمنصورة. وحديدها شبيهه بالبيض إلا أنه مختلف الجوهر وهي أقطع ما يكون من المولدة. وأثمانها ما بين خمسة عشر درهما إلى عشرين [درهما]¹⁶⁰. ومنها ما يطبع بمصر مما يبرز بالطول طولا فتستوي وجوهه ويشند لاسطوانه قطعه. فأما حديده فحديد بصرى. وأثمانها عشرة دراهم¹⁶¹. يطبع منها الخرشت [والجهازداس] والشهاداست¹⁶² والتيه داست¹⁶³ والساذج وغير ذلك (36).

النرماهن

ومنها أسياف نرماهن تقع من سيوف الشراة والروم جميعا ومن سيوف الهند. فما كان من سيوف [الهند] يسمى مندلى ويعرف سيفها¹⁶⁴ بضطراب قده والتوانه وأثر المبرد في شفرته. وهو في مثال طبع الفاقرون وليس يظهر في النرماهن كله قليل ولا كثير. فأما سيوف الروم والشراة فسيوف سواذج دقاق طوال مضطربة القدود. إذا نظرت إلى السيف نظرت إلى مواضع داخله ومواضع خارجه. وهي تسمى بالفارسية كهر بلام¹⁶⁵. هذا أطل الله بقاءك فيما أمرت بإيضاحه والله أعلم¹⁶⁶.

¹⁶⁰ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹⁶¹ ترد هذه الجملة في أ في نهاية هذه الفقرة.

¹⁶² الشهاداست: أ "الشهاداست".

¹⁶³ هذا النوع غير مذكور في أ.

¹⁶⁴ هذه الكلمة غير موجودة في أ.

¹⁶⁵ كهر بلام: أ "شهر بلام".

¹⁶⁶ هذه الجملة موجودة في أ فقط. تنتهي مخطوطة أ بالكلمات "تمت الرسالة والحمد لله رب العالمين والصلاة على رسوله محمد".

white swords, though it has a different nature, and they are the most trenchant of the indigenous swords and their prices are between fifteen dirhams and twenty dirhams.

Among them are those forged in Egypt, which stand out for their length. Their faces are even and on account of this evenness they have a strong cut. As for their iron it is Basran. Their prices are ten dirhams. From them is forged the *kharishat*, [the *jahārdāst*], the *shahādāst*, [the *tīhdāst*], the plain one, and others (36).

The soft iron (narmāhan)

And among them there are soft iron swords that are found among the swords of both the Shurat and the Byzantines, and among the sords of India. And among the swords [of India] are those called Mandali, and [this sword] is recognised by its distorted shape, its curvedness and by the trace of the file on its blade. It was forged like the *fāqirūn*, and neither little nor much (watering) appears in the soft iron.

As for the swords of the Byzantines and the Kharijites they are plain, thin, long swords with distorted shapes. If you look at the sword, look at places inside it and outside it. In Persian they are called *kahr balām*⁷⁶. This, may God extend your life, is what you ordered to be set out, and God knows best.

Appendix 2

Bīrūnī on Iron

Brian Gilmour and Robert Hoyland

Introduction

Muhammad ibn Ahmad al-Bīrūnī was born in 362/973 of an Iranian family in the province of Khwarizm on the southern shores of the Aral Sea. He spent his formative years there, receiving a thorough scientific training, before travelling to seek patronage from a variety of rulers. At the court of Jurjan, southeast of the Caspian Sea, he wrote his first great work, the “Chronology of Ancient nations” (ca. 390/1000), on the subject of calendars and eras, and important mathematical, astronomical and meteorological problems. Later he was employed at the court of Ghazna, probably as astrologer to the famous Sultan Mahmūd, and there for many years taught the Greck sciences whilst acquiring th enormous wealth of knowledge, including mastery of Sanskrit, that would go into his perhaps most famous work the “Description of India” (ca. 421/1030). He wrote on most of the sciences current in his time and had a very lively enquiring mind, and this makes the chapter on iron in his “Sum of knowledge about Precious Stones” (*Kitāb al-jamāhir fī maʿrifat al-jawāhir*) all the more interesting to us. Bīrūnī (d. 440/1048) wrote this work later in his life, probably during the reign of Mahmūd’s grandson. Mawdūd (r. 432-442/1041-1050).

This book is, however, not a straightforward one, and contains much more than the title would lead one to think¹. The introduction praises the wisdom manifested in the Creatin and describes the various ranks of creatures and the way God has given to each just what it is required for its existence. Next come fifteen “invigorating discourses” (*tarwīha*) that move logically through the subjects of humans` relatinonship to nature, their needs, the necessity for them to live in a community, their provision of goods and services to one another and the desirability of having a common means of exchange to facilitate this, and the way that they settled upon precious stones and minerals and subsequently came to exalt themselves through these, accumulating them and adorning themselves with them. This naturally leads him to the main subject of his book, a discussion of the principal precious stones and minerals, of which the chapter on iron forms a part. Since this text is somewhat diffuse, incorporating anecdotes,

poetry and the like, we only treat here what relates specifically to the manufacture of swords and to their different kinds².

Translation

[247]³ God Almighty said: “We sent down iron, which possesses power, strength and many benefits for mankind” (57.25)... [explanation of this verse and man`s need for iron]... [248] Mined iron is divided into two types⁴. One of them is smooth and called *narmāhan* and is labelled feminine because of its weakness. The other is hard and called *shāburqān*, and is labelled male because of its strength. It accepts quenching despite its tendency towards lack of flexibility⁵. *Narmāhan* is likewise divided into two types. One is the substance itself; the other is its water, which flows out when it is smelted and purified from the ore. This is called *dūs*, and in Persian “datestone” (*astah*), and on the borders of Zabilstan⁶ *raw*, because it comes out [of the ore] very quickly and precedes iron in reaching a fluid state. It is hard and white tending towards silvery⁷.

For *shāburqān* are made Byzantine, Russian (*Rūs*) and Slav swords⁸. Sometimes it is called *qala*^c, pronounced with an “a” on the “l” and also without a vowel [i.e. *qal*^c]. Thus it is said: “You hear a ring from the *qala*^c, but a harsh tone from anything else”. A type of sword is ascribed to it, hence called *Qala*^ci. Some people believe that their name derives from a place, as is the case with the Indian, the Yemeni and the Mashrafi swords, and they say that they were brought from Kalah, just as tin was brought from there, and so the *Qala*^ci swords are related to this place. They are broad swords and not

Improbably are used as a metaphor for whiteness brightness (*bayād*) in Arab poetry.

[The poetry] al-Husayn ibn al-hamān al-Murrī said: “We bring heavy rocks upon their [helmeted] heads while the Byzantine Qala^ci swords are blunted by them”. The allusion here is to *shāburqān*, since Byzantine swords are made from nothing else⁹. [The poetry] al-^cAjjāj said: “Byzantine smiths have created // white blades from black iron water”, and again [249]: “When death embraces // I strike them with a Qala^ci sword...[*qala^c* and its meanings in poetry are now discussed.

[250] ...*Qala^c* means clouds; clouds resemble mountains; and iron is extracted from mountains, and because of this common aspect iron has been connected with the heavens. A Hudhali poet said: “Be content with a heavenly Indianized Qala^ci sword, above the forearm and below the elbow, of pure iron that has suffered long working and the stomach of a hungry bird”. The first line has only to do with the creation of iron, and concerns its clearly stated descent from heaven. By “Indianized” (*muhammad*) the poet does not mean that the sword is from India; rather he calls the sword thus because it is an essential attribute of it. In the second line he expresses what others have said, that the fire of the thunderbolt penetrates and sinks into the ground, and digging there afterwards would yield the iron from which Qala^ci swords are made. As for “the stomach of a hungry bird”, this means that this iron is cut up and heated until it becomes like hot coals, and is thrown to the ostrich so that the dross may be removed in its stomach. The ostrich will then excrete it pure and in the proper state to have swords struck from it, and to be ground and polished. Those who have witnessed ostriches swallow the heated iron assert that it does not linger in their stomachs; rather they excrete it immediately. I have also heard concerning *shāburqān*, from a number of sources, that the Russians and Slavs would cut it into small pieces, work it into a powder, feed it to ducks, and then wash it out from their dung. They repeat this action many times, and then they weld it together after immersing it in the fire, and they forge their swords from it. [The poet] Ibn Bābak says: “The darkness of battle is parted with a glittering¹⁰ [of swords] as a veil of clouds (*qala^c*) is dispersed by lightning”.

Even if we had not known that *dūs*¹¹ is not deployed on its own for making swords, for it cannot resist a blow, we would have guessed that the sword of Abū al-Abyad al-^cAbsī when he says [251]: “I possess nothing but a breastplate and a helmet and a bright polished sword from the water of iron” and also the sword of the one who says: “And when the sword strikes [the enemy] with both sides, you see something like salt spraying out from his mail coat” were forged from *dūs*¹².

It is stated in some books regarding thunderbolts that when they strike, whatever is

liberated from them goes upwards and whatever fragments are burnt in the atmosphere fall to the ground [discussion of properties of lightning]... Air, together with thunder, lightning and thunderbolts, can remove metal pieces to another place, either [directly] from the surface of the earth or thrown up with mud from within the earth. This is attested to by iron found some years ago in Jawzajan¹³. It was [part of] a ship anchor according to the testimony of one of those who fetched it and on the basis of its resemblance to that (i.e. an anchor), although its shape had changed from the heating it experienced as a result of the severity of its fall. Its substance was not of good quality, since anchors are not made of high quality iron: the purpose of them is merely weight. Similarly, the village of Tā^cūn, one of the villages of Pūnshanj [near Herat], was rained on one cloudless day by metal pieces resembling bad sulphur, pockmarked like iron dross. It was hot when it fell, with water hissing from it, and it was from one to two *mannas* [in weight].

Among the types of mined iron next in rank to *dūs* is¹⁴ *tūbāl*, which is the peel of iron thrown off by the hammer [that is, hammer-scale] and the dross of iron [that is, non-metallic waste or slag]. The rust of *tūbāl*, called on account of its redness saffron, is related to *dūs*. The [equivalent] weight of *tūbāl* in relation to a bar of gold is forty-one and a third. Chemists claim that they can soften iron with arsenic¹⁵ so that it melts as fast as tin, and that when it becomes thus as hard as tin and loses [252] its squeaking sound, it becomes, however, less white. These are the characteristics of simple iron.

As for the compound of *narmāhan* and its water, the latter being the first to become liquid in the purification process, it is steel (*fūlādh*). Heart is specially noted for steel, and it is [there] called eggs (*baydāt*) on account of its shape. These eggs are long and round-bottomed according to the form of the crucibles [in which they are made], and from them Indian swords and the like are fashioned. According to its composition steel is of two types.

One [such] is that the *narmāhan* and its water are melted equally in the crucible and they blend so that one cannot distinguish the one from the other, in which case it is good for files and the like. This immediately leads one to think that *shāburqān* is of this type and by a natural process is quenched. Second is that the melting of what is in the crucible will be unequal so that the two do not mix completely, but rather their parts remain separate and each part of their two colours can be seen on close inspections. This is called watering (*fīrind*). Men vie with one another for sword-blades that combine it with greenness, and they expatiate on its description... [verses about watering cited; c.f. Schwarzlose, pp. 147-49 and 165-71, in ch. 4 above].

A green shine is preferred for the Yemeni and Indian sword-blades, and white for

the Mashrafi. Al-Bāhilī said in his *Kitāb al-silāh* (“Book on Weapons”)¹⁶: watering is the ornamentation on the broadside (*matn*) of the sword, and [253] a shine (*lam*^c) of varying colour¹⁷. Grooved swords (*mushattab*) are those in which paths like channels¹⁸ (*jadāwil*) are made; sometimes they are raised and sometimes they are sunken. The latter mentioned only occurs when there is just one channel. If there is more than one channel, then there would have to be a raised part between every two channels.

The Surayji swords are those attributed to the craftsman Surayj, their maker. Some say that the name derives from the diminutive form of *sirāj* [meaning a “lamp”] on account of their brightness, but this is a false derivation. Qala^ci swords are related to the word qala^c a.Qasāsi swords are associated with *qasās*, a mountain in which there is an iron mine. The Mashrafi swords are said to be related to the Mashrāif, which are village near to the countryside known also as the Mazālif¹⁹. It is also said that Mashrafi refers to a pre-Islamic smith of the tribe of Thaḳīf whose name was Mashraf. They say that the *firind* of the Yemeni swords is crooked, of equal knotting, and white on a red or green ground. Qubūri are swords known by this name, as though they were found in the graves of eminent people²⁰. I have heard that the Qubūri swords are those that do not accept equally the medicament (*dawā*^o) during the melting (*al-sabk*) [in the crucible] so that there remain soft veins of feminine metal that do not drink [that is, they do not melt and merge with the rest]. If this happens on both edges, they do not cut for lack of quenching; and if turns away from both edges, they do no damage. The *muhammad* sword is so-called by virtue of its being made in India, but is sometimes attributed so Sri Lanka in translation into Arabic [verse example given].

Firind is referred to in Khurasan as *jawhar* and pertains to the sword. It may be hidden by heating and polishing. When the people of India want to bring it out, they coat it with yellow iron sulphate (*zāj*) from Bamyan or with white iron sulphate from Multan. The Bamyani [iron sulphate] must be superior or it would not be transported to Multan.

During quenching they coat the broadside (*mant*) [that is full width] of the sword with suitable clay, cow dung and salt in the form of a paste, and test [that is to mark out] the place of²¹ quenching at two fingers from the two sides of the cutting edges. Then they heat it by blowing [the hearth with bellows], the paste boils, and they quench it and cleanse its surface from the coating on it with the result that the nature (*jawhar*) appears. Iron sulphate (*zāj*) can also be mixed with the salt.

The cutting power in the watering (*firind*) and the white *dūs* [254] is a result of its

hardness, but breaking and crumbling are also associated with it. If female black iron covers it on both sides, it remains cutting and is preserved from this defect. This is the characteristic of the watering²². You will never find a people more perceptive about its types and its names than the Indian people. Among these watering there are some that have very fine marking so that they resemble the tracks of ants, and others with coarser and more spread out markings. These latter give rise to varieties of images, as happens in the clouds and in water poured onto the ground and in connection with what we have related about the onyx.

The Russians used to make [the edges of] their swords from *shāburqān* and the channels²³ in the middle of them from *narmāhan* so that they might be firmer when striking and less liable to break, for steel will not stand the coldness of their winters and breaks with a single blow. When they examined the watering, they devised for the grooves a web of stretched threads made from both of the two types of iron *shāburqān* and the female (*narmāhan*). And there resulted from this web welded by immersion wonderful things, just as they intended and wished for. However [on blades made of crucible steel (*fūlādh*)], the watering does not occur during manufacture by design nor by desire, by rather by chance.

There is no harm here in mentioning what we have learnt from those with insight into the swords used by the Indians²⁴. The best kind is called *palārak*, and it comprises their most valuable swords and daggers. They assert that its iron is smelted from the red sand in the regions of Kanūj²⁵. They melt it with crystalline borax, as borax paste is only of use to goldsmiths; this is a liquid that congeals as borax. In this kind the white nature (*jawhar*) prevails over the black. Another kind is called *rūhīnā*, forged in Multan from Harawi egg-shaped ingots. There is also a kind called *mūn*, which is likewise forged in Multan from those ingots and which is of three varieties. The best of them²⁶ is named the *amrānī*, which is close to the *palārak*, and its nature is predominantly black; the coarsest²⁷ and lowest quality of them is named *harmūn*, and between them [255] are those of intermediate character. The Yemeni swords resemble this kind [i.e. the *mūn*], as does a black kind called *nīlah-band*²⁸. Another kind is called *bākhirī* and it is of three sorts. There is an original one, which is close to the *rūhīnā*. And there is the *mukhawwas*, which resembles the *mukhawwas* cloth

(*saqlātūn*)²⁹ and that is because the ingot (*bayda*) is not forged lengthwise, but rather at its head, so that it spreads out like a plate, then they cut it [then mount it] in a vice (*lawlabīyan*)³⁰ and straighten out its roundedness. Next they make the sword proportional³³ and its nature comes out *mukhawwas*. The third sort of *bākhirī* is every sword with no nature, and this term is applied without epithet. There is also a kind called *majlī*³², which resembles the *bākhirī* except that there occur on it images of animals and plants and the like. It consists of two varieties: one has the whole of the image on one of the sides of the sword, and the other has part of the image on one side and the rest of it continuing on to the other side. The latter is the more valuable of the two and is worth as much as a choice elephant. If the image is of humans, it is the most costly of all.

°Amr b. Ma°dikārib had a sword called Dhū l-Nūn since it had the likeness of a fish in the middle of it [verse cited in illustration of this].

The sword Dhū l- Faqār was in the possession of Munabbih ibn al-Hajjāj. The Prophet Muhammad selected it and chose it for himself on the day of the battle of Badr.

Everything outside of these types and made of inferior iron is called *kūjarah*. Just as on horses there are circles which portend either good or evil, a censorious circle being known as the *qālī*^c, so likewise in swords possessing watering there is a place, black like the patch devoid of engraving, which if it is removed harms the blade. For this reason it is left alone. If it goes through from one side to the other, its purchasers [256] regard it as an evil omen. However, they prefer it on both halves of the sword, and if it points towards the edges it is a bad omen for the adversary, and if it points towards the hilt the bad omen reverts to the owner.

Mazyad ibn °Alī, the Damascan smith has [written] a book on the description of swords, and its characterisations were incorporated into the treatise of Kindi. It begins with the making of eggs of steel, the construction of the furnace, the making and design of crucibles, and a description of the clays and their specifications. Then he instructed that in each crucible there should be put five *ratls* of horseshoes and nails made of *narmāhan*, together with ten *dirhams* weight of antimony, golden marcasite³³

and powdered magnesia³⁴. The crucibles are to be plastered with clay and put into the furnace. The latter is to be filled with charcoal and the crucibles then to be blown upon with Byzantine bellows, each bellows worked by two men³⁵ until the iron melts and revolves. Small bags³⁶ should be prepared for it, in each myrobalan, pomegranate peel, the salt of dough and pearl shells, in equal quantities and ground up, each 40 *dirhams* in weight. One small bag is to be thrown into each crucible, which is then to be blown upon strongly for an hour without pause. Then it is to be left until cool, when the eggs may be extracted from the crucibles.

One who was in Sind told me that he sat with a blacksmith making swords. He looked at the swords closely, and their iron was *narmāhan*, and the blacksmith sprinkled on the iron a powdered medicament of reddish colour, threw it³⁷ and welded it by immersion. Then he took it out and lengthened it by hammering, and he repeated the sprinkling and working many times. I asked him about it and he looked at me contemptuously. I scrutinized it and saw that it was *dūs*, which he was maxing with *narmāhan* by hammering and immersion, just as eggs are worked in Heart by melting and similar to what [Mazyad b. ^c Alī] the Damascan mentioned.

It is said about the nature of the sword that it cannot be changed from one type into another, and for that reason the ancient type of it is praised and exalted. Though this is not inconceivable, I note their statement about [257] the aid of fire in changing one of two ingredients into the other so that its whiteness or blackness becomes less, or about polishing to the degree that it reveals, by peeling, what is inside, under the upper surface of the body.

One of the fanciful stories about iron, and often reported in books, is that when Qandahar was conquered [by the Muslims in the 2nd/8th century] a column of iron was found there that was seventy cubits in height. When Hishān ibn ^c Amr³⁸ excavated its base, it was revealed to be thirty cubits under the ground³⁹. He enquired about it and was informed that a king (*tubba^c*) of Yemen had come to their land with the Persians⁴⁰. On capturing Sind, they had cast this column from their swords and said: “We do not intend to pass beyond this country to other lands”, and they then took possession of Sind. This is the talk of someone with no insight into the study of minerals and the actions of great persons...

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Smith C.S: "A History of Metallography". The University of Chicago Press, (1988), pp. 14-29.
- 2.- Figiel L.S.: "On Damascus Steel". Atlantas, FL: Atlantas Arts Press, (1991).
- 3.- Badía Leblíh, D.: Viajes de Alí Bey. Madrid. Domingo Badía (Alí Bey): "Viajes de Alí Bey". Ed. Óptima, Barcelona (2001).
- 4.- Mayer, L.A.: "Islamic Armoures and Their Works". Edit Albert Kundig, Ginebra (1962).
- 5.- Lambton, A.K.S.: "Islamic Society in Persia". Edit I.B. Taurus, London (1954).
- 6.- Mohen, J.P.: "Metalurgia Prehistórica. Introducción a la Paleometalurgia", Ed. Masson, Barcelona (1992), pp. 9-18.
- 7.- Jorge, J.: "Christian Thomsen Jürgensen: una apreciación en el bicentenario de su nacimiento". Acta Archaeologica 58, (1987), pp. 1-15.
- 8.- Elgood, R.: "Islamic arms and armour". London, (1979).
- 9.- Mayer, L.A.: "Saracenic arms and armour". Ars Islamica, (1943), pp. 1-13.
- 10.- Mayer, L.A.: "Islamic metal workers and their work". Ginebra, (1959).
- 11.- North, A.: "An introduction to islamic arms". London Her Majest's Stationery Office, (1985).
- 12.- Nicolle, D.: "Early Medieval Islamic Arms and Armour". CSIC, Madrid, (1976).
- 13.- Baer, E.: "Metalwork in medieval islamic Art", (1983).
- 14.- Assadullah Sobren Melikian-Chirvani: "Studies in iranian metalwork V: a sassanian Tagle in the round", (1969), pp. 2-9.
- 15.- Elgood, R.: "The arms and armour or Arabia, in the 18th-19th and 20th centuries", (1994).
- 16.- Berge, P.M.: "A study of Damascus Steel". Master of Science, Iowa State University, Ames, Iowa, (1994).
- 17.- Fehervani, A.: "Working in metal: mutual influences between the islamic wordl and the medieval west", (1977).
- 18.- Alenxander, D.: "The arts of war: arms and armour of the 7th to 19th centuries", (1995).
- 19.- Anossoff, P. and Bulatakh, O, Gornyj Journal (2), (1841), pp. 157-318.
- 20.- Anossoff, P.: "Memoire sur L`Asier Damassé". Annuaire du Journal des Mines de Russie, (1841), pp. 192-236.
- 21.- Criado, A.J. et al.: "Estudio y restauración del sable, en acero de Damasco, de Mehemet Alí". Gladius, (2001), pp.291-306.

- 22.- Stoklein, H.: "Arms and Armour" en A Survey of Persian Art, vol. VI. Pope A.U. (ed) Oxford, (1938), pp. 2555-2585.
- 23.- Wadsworth, J. and Sherby, O.D.: "On the Bulat-Damascus steel revisited". Progress in Materials Science, vol.25, (1980), pp. 39-40.
- 24.- Verhoeven, J.D. and Pendray, A.H.: "The mystery of the Damascus sword". Muse, 2, 2, (Abril 1998), pp. 35-43.
- 25.- Wadsworth, J. and Sherby, O.D.: "Damascus steel-making ". Science, 216, (1983), pp. 328-330.
- 26.- Verhoeven, J.D. and Gilbson, E.D.: "The divorced eutectoid transformation in steel". Metallurgical and Materials Transactions A., vol. 29A, (Abril 1998), pp. 1881-1889.
- 27.- Wadsworth, J. and Sherby, O.D.: "Damascus steel ". Science American, 252, (1985), pp. 112-120.
- 28.- Verhoeven, J.D.: "Damascus steel. Part-I: Indian wootz steel". Metallography, 20, (1987), pp. 145-151.
- 29.- Verhoeven, J.D. and Jones, L.L.: "Damascus steel. Part-II: origin of Damascus pattern". Metallography, 20, (1987), pp. 153-180.
- 30.- Verhoeven, J.D.; Baker, H.H.; Peterson, D.T.; Clark H.F. and Yater W.M.: "Damascus steel. Part-III: the wadsworth-sherby mechanism". Materials Characterization, 24, (1990), pp. 205-227.
- 31.- Verhoeven, J.D. and Jones, L.L.: "Damascus steel. Part-II: origin of Damascus pattern". Metallography, 20, (1987), pp. 154-155.
- 32.- Verhoeven, J.D. and Peterson, D.T.: "What is Damascus steel?". Materials Characterization, 29, (1992), pp. 335-341.
- 33.- Verhoeven, J.D. and Pendray, A.H.: "Experiments to reproduce the pattern of Damascus steel blades". Materials Characterization, 29, (1992), pp. 195-212.
- 34.- Verhoeven, J.D.; Pendray, A.H. and Berge, P.M.: "Studies of Damascus steel blades. Part-II: destruction and reformation of the pattern". Materials Characterization, 30, (1993), pp. 187-200.
- 35.- Verhoeven, J.D. and Pendray, A.H.: "A reconstructed method for making Damascus steel blades". Metal Materials and Processes, vol.4, n°2, (1992), pp. 93-106.
- 36.- Verhoeven, J.D. and Pendray, A.H.: "Studies of Damascus steel blades. Part-I: experiments on reconstructed blades". Materials Characterization, 30, (1993), pp. 175-186.
- 37.- Wadsworth, J. and Sherby, O.D.: "Comments on Damascus steel. Part-III: the wadsworth-sherby mechanism" by Verhoeven, J.D et al. Materials Characterization, 28, 2, (1992), pp. 165-178.
- 38.- Verhoeven, J.D.; Pendray, A.H. and Berge, P.M.: "Studies of Damascus Steels Blades. Part II: destruction and deformation of the pattern ". Materials Characterization, 30, n°3, (1993) pp.187-200.

- 39.- Verhoeven, J.D.; Pendray, A.H. and Gibson, E.D.: "Wootz Damascus Steel Blades". *Materials Characterization*, 37, (1996) pp. 9-22.
- 40.- Verhoeven, J.D.; Pendray, A.H. and Dauksch, W.E.: "The Key Role of Impurities in Ancient Damascus Steel Blades ". *JOM* 50, 9, (1998), pp. 58-64.
- 41.- Verhoeven, J.D.; Peterson, D.T. and Baker, H.H.: "Damascus Steel, Characterization of One Damascus Steel Sword". *Materials Characterization*, 24, (1990), pp. 355-374.
- 42.- Wadsworth, J. and Sherby, O.D.: "On the Bulat-Damascus Steel Revisited". *Prog. Materials Science*, 25, (1980), pp. 35-38.
- 43.- Wadsworth, J. and Sherby, O.D.: "Damascus steel and superplasticity. Part-I" *Sampe Journal*, vol. 31, N°4, (1995), pp. 10-17.
- 44.- Wadsworth, J. and Sherby, O.D.: "The History of Ultrahigh Carbon Steels". *Thermomechanical Processing and Mechanical Properties of Hipereutectoid Stels and Cast Irons*, D.R. Lesver, C.K. Syn and O.D. Sherby, Eds., The Minerals, metals and Materials Society, Warrendale, PA 15086, (1997), pp. 1-39.
- 45.- Sherby, O.D.; Ruano, O.A.; Carsi, M. and Oyama, T.: "High Temperature Deformation of Ultrahigh Carbon Steels". *The Johannes Weertman Synposium*, R.J. Arsenault et al. Eds., The Minerals, metals and Materials Society, Warrendale, PA 15086, (1996), pp.3-9.
- 46.- Sherby, O.D.; Ruano, O.A. and Wadsworth, J.: "Ancient Blacksmiths, the Iron age and Modern Metallurgy". *Congreso de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, Badajoz (1998), pp. 35-45.
- 47.- Criado, A.J.; Martínez, J.A. y Calabrés, R.: "Proceso para la forja de aceros de muy alto contenido en carbono". *Patente Nacional nº 9701203 e Internacional nº WO 98/55659*. Universidad Complutense de Madrid.
- 48.- Criado, A.J.; Martínez, J.A. y Calabrés, R.: "Tratamiento térmico y forja de aceros inoxidables martensíticos de muy alto contenido en carbono, para la obtención de estructuras enfibradas". *Patente Nacional nº 9800943*. Universidad Complutense de Madrid.
- 49.- Criado, A.J.; Martínez, J.A.; Calabrés, R. y Arias, D.: "El secreto del acero de Damasco". *Investigación y Ciencia*, (Enero 1997), pp. 16-25.
- 50.- Criado, A.J.; Martín, L.; Martínez, J.A.; Calabrés, R.: "Improvement of the mechanical properties of a Fe-1,3%C steel by thermomechanical treatments". *Praktische Metallographie*, 12 (32), (1995), pp. 625-632.
- 51.- Von Schwarz C.R.: "The Indian iron and steel industry", *Stahl und Eisen*, 21, (1901), : pp: 209-11; 277-83; 337- 41.
- 52.- J. duc de Luynes, H.T.P.: "Mèmoire sur la fabrication de l'acier fondu et Damassé". *German extract in Polytechnische Centralblat*, 1, Paris, (1845), pp. 315-322.
- 53.- Stodart J. and Faraday, M.: "Experiments on the alloys of steel made with a view to its improvement". *Quarterly Journal Science*, 9, (1820), pp. 319-330.
- 54.- Faraday, M.: "Analysis of wootz or Indian steel". *Quarterly Journal Science*, 7, (1819), pp. 288-290.

- 55.- Fahr-i-Mudabbir: "Adab al-harb". Edit. Suhayli Hwansari, Teherán, (1967), pp.1346.
- 56.-Biruni (973-1048), "Fi dikh al-hadid", Kit b el-Jemahir; J. Chardin, Voyage en Perse et aux Indes Orientales, ed. Ernst, paris, 1894, pp.: 355; cf A. mazaheri, "Le sabre contre l'Eppé", pp. 669-686.
- 57.- Mushet, D.: "Experiments on wootz or Indian steel". Phil. Trans. Royal Society, (1804), pp. 95-175. También Phil. Mag., (1805), pp. 22 y 40-48. Reimprimido en Mushet's papers on iron and steel, London, (1840), pp. 650-678.
- 58.- Heath, J.S.: "On Indian iron and steel". Journal Royal Asiatic Society, 5, (1839), pp. 390-397.
- 59.- Massalski, A.: "Preparation de l'acier Damasse en Perse". Annuaire du Journal des Mines de Russie, (1841), pp. 297-308.
- 60.- Malcolmson, J.G.: "Notes explanatory of a collection of geological specimens from the country between Hyderabad and Nagpur". Journal, Asiatic Society of Bengal, 5, (1836), pp. 96-122.
- 61.- Baker, J.: "Method of renewing the giogare or flovery grain of persian swords commonly called Damascus blades", Fundgrafen des Orientes, (1816), 5, pp. 44-43. Reprinted (undername S. Baker) in the Annual Register, (1818), pp.599-602.
- 62.- Franciscus Justinus (siglo XVII): "The Paintings of the Ancients". Londres 1638. Ernest H. Gombrich: "El legado de Apeles". Alianza Editorial. Madrid 1982.
- 63.- John Philoponus (siglo V): "On Aristotele on the Soul", translated by W. Charlton. London and Itaca (2005).
- 64.- Longino (siglo III d.C.): "Sobre el Estilo / Sobre lo Sublime". Intr. trad. y m. de J. García López. C. García Gual Edit. Gredos. Madrid (1996).
- 65.- Ciceron (siglo I a.C.): "Discursos. Diálogos. Sobre la República. De las Leyes. Cuestiones académicas" (Académica, II, 20 y 86). Edit. EDAF, S.A. Madrid (1967).
- 66.- Plinio (siglo I d.C.): "The Elders Pliny's Chapters on the History of Art". Naturales Historia, XXXV 29.K. Tex-Blake and E. Sellers, London (1896), pp.96.
- 67.- Gombrich, E.G.: "The Heritage of Apelles".Phaidon Press, Ltd. Oxford. Oxford (1976).
- 68.- Hans Van de Waal: "The Linea Summae Tenmitatis of Apelles: Pliny's Phrase and Its Interpreters ". Zeitschrift für Aesthetik und allgemeine kunstwissenschaft, XII / I, (1967), p. 532.
- 69.- Arriano, F.: "Anábasis de Alejandro Magno". Obra completa. Editorial Gredos. Vol. I: Libro I-III; Vol. II: Libro IV-VIII. Madrid (1982).
- 70.-Herodoto, VII, 66; CTESIAS, Ed. Muller, pp.80
- 71.- Plinio, Historia Natural, 39, pp.15.
- 72.- Al-Idrisi; Nuzhay al-mûstaq-fihtiraq al-afaq. Traducción A. Jaubert: "La Géographie d'Édrisi", Paris, (1837), pp.66.

- 73.- Frederic, L.: "L'Inde de l'Islam". Arthaud, (1989).
- 74.- Bhardwaj, J.C.: "Aspects of ancient indian technology", Motil banarsidass, Delhi, (1979), pp. 143-165.
- 75.- Rao, K.N.; Mukherjee J.K. and Lahiri, A.K.: "Some observations on the structure of ancient steel from South India and its mode of production". Bull. Hist. Group. 4, (1970), pp. 12-17.
- 76.- Crespo, R. y Roca, A.: "Las ciudades Swahili". Historia 16 AÑO XIV, nº164, (Diciembre 1989), pp. 43-49.
- 77.- Coulon, C.: "Les musulmans et le pouvoir en Afrique noire", Karthala, (1983).
- 78.- Allan, J.W.: "Persian metal technology". 700-1300 AD Ithaca, London, (1979).
- 79.- Mantran, R.: "la expansion musulmana (siglos VII-XI)". Edit. Labor, Barcelona, (1982).
- 80.- Zschokke B.: "Du Damassé et des lames de Damas" Revue Metallurgie (Paris) Part 1, 21, (1924), pp. 636-669.
- 81.- Al-Kindi (800-870). Des diverses sortes d'épées, cité par A. Mazahéri: "Le sabre contre l'épée ou l'origine chinoise de l'acier au creuset". Annales ESC, (1958), pp.671.
- 82.- Bronson, B.: "The making and selling of wootz, a crucible steel of India". Archeomaterials (1), (1986), pp. 13-51.
- 83.- Karlsson, M.: "Iron and steel technology in hispano-arabic". Gladius, XX, (2000), pp 239-250.
- 84.- Coomaraswamy, A.K.: "Medieval Sinhalese Art". (20 Ed.) Pantheon, Nueva York, (1956), pp. 189-194.
- 85.- Della Porta G.B.: "Magiae naturalis libri XX", Nápoles, (1588) (Eng. Trans., London, 1658). Reimprimido en Nueva York (1958).
- 86.- Mayer, L.A.: "Islamic armourers and their works", Génova, Albert Kunding, (1962).
- 87.- Creswell, K.A.C.: "A bibliography of arms and armour in Islam", London, (1956).
- 88.- Breant, M.: "Description of a process for making Damasked steel", Annals of Philosophy, 8, (1824), pp. 267-271.
- 89.- Ibn al-Baytâr, Abd Allâh B. Ahmad: "Traité de simples". French translation by L. Leclerc. Notices et extraits des manuscrits de la Bibliothèque Nationale 23 (1), (1877), pp. 1-345.
- 90.- Al-Kindî, Ya'qûb ibn Ishaq: "Al-Suyûf wa Ajnasuhâ". Edit by A.R. Zakî, Bulletin of the Faculty of Letters (Fouad University), 14 (2), (1952), pp. 1-36.
- 91.- Alfonso X, King of Castile,: "Lapidario y el libro de las formas e imágenes". Edit. R.C.Diman and L.W. Winget, Madison, (1980).
- 92.- Alfonso X, King of Castile,: "Los libros del saber de astronomía". Edit. M.Rico y Sinobas, Madrid, (1963).

- 93.- Ibn Hudhayl, Alí B. Abd al-Rahmân: "La parure des chevaliers et l'insignes des preux". French translation by L. Mercier, Paris, (1924).
- 94.- Yule, H. and Cordier, H.: "The book of Ser Marco Polo". London, (1975).
- 95.- Lang, J.; Craddock, P.T. and Simpson, St.J.: "New evidence for early crucible steel". JHMS 32 (1), (1998), pp. 7-14.
- 96.- Péres, H.: "La poesie andalouse en arabe classique au XIe siècle". Spanish translation Esplendor de al-Andalus by M. García Arenal, Madrid, (1990).
- 97.- Vallvè Bermejo, J.: "La industria en al-Andalus". Al-Qantara (1), (1980), pp. 209-241.
- 98.- De Alcalá, P.: "El léxico árabe andalusí según el vocabulista en arabico". Edit. F. Corriente, Madrid, (1988).
- 99.- Corriente, F.: "A dictionary of andalusí arabic", Leiden, (1997).
- 100.- Hoffmann, G.: "Ibn Khallikân's biographies as a source for problems of Islamic military history" Actas XVI, Congreso UEAI, (1995), pp. 243-248.
- 101.- Al-Zuhrî, ibn Abd Allâh Muhammad: "Kitâb al-Ja`rafiyya". Edit. M. Hadj-Sadok, Bulletin des etudes Orientales (21), (1968), pp. 111-310.
- 102.- Ibn al- Awwâm, Yahyâ B. Muhammad: "Kitâb al-Filâha". Edit. J.A. Banquero, Madrid, (1988).
- 103.- Ibn Jubair: "The Travels of Ibn Jubair". Edit. By R.J.C. Broadhurst. London (1952).
- 104.- Marín, P.: "Los miraculos romançados de Pero Marín". Edit and commented by Kart-Heinz Antón, vol. 14 of Studia Silensia, Abadía de Silos, (1988).
- 105.- Al-Maqqarî, Ahmad B. Muhammad.: "The history of Mohammedan Dynasties in Spain". English translation by P. de Gayangos, 2 volumes, London, (1840).
- 106.- Al-Maqqarî, Ahmad B. Muhammad.: "Nafh al-tîb min ghusn al-Andalus al-ratîb". English translation by P. de Gayangos, 10 volumes, Cairo, (1849).
- 107.- Wilkinson, H.: "On the cause of the external pattern or catering of the Damascus sword-blades". Journal Royal Asiatic Society, 4, (1837), pp. 187-193.
- 108.- Ragib, Y.: "La fabrication des lames damassées en Orient", JESHO, 40, 1 E.J. Brill, Leiden, (1997).
- 109.- Lombard, M.: "Les métaux dans l'ancien monde". Ed. Paris-La Haye, (1974), pp. 32-37.
- 110.- Alexander, D.: "Dhu'l-Faq r and legacy of the prophet, m r th ras l all h". Gladius, XIX, (1999), pp. 157-187.
- 111.- Pero-Sanz Elorz, J.A.: "Fundiciones Férreas". Editorial Dossat, S.A., Madrid (1994).
- 112.- Criado Portal, A.J.: "Estructuras Metalograficas de los Aceros Especiales" Editado on line en www.antoniocriado.es , Madrid (2010).

- 113.- Massalski: "Preparación de l'acier Damasse en Perse", Ann. Du Journal des Mines de Russie (1841), pp. 297-308.
- 114.- HTPJ duque de Luines: "Memoire sur la fabricación de l'acier Fondu et Damasse" Paris, (1844).
- 115.- Panseri C.: "Damascus Steel in Legend and Reality", Gladius, IV, (1965), pp. 5-66.
- 116.- Belaiew, N.T.: "Uber Damast", Metallurgie, 8, (1911), pp. 449-456.
- 117.- Belaiew, N.T.: "Damast, seine struktur und eigenschaften", Metallurgie, 8, (1911), pp. 699-704.
- 118.- Belaiew, N.T.: "Damascene steel", Journal Iron and Steel Inst., 97, (1918), pp. 417-439.
- 119.- Baker, J.: "Method of Renewing the Giogare or Flovery Grain of Persian Swords Commonly Called Damascus Blades", Fundgrafen des Orients, (1816), 5, pp. 40-43. Reprinted (undername S.Baker) in The Annual Register, (1818), pp. 599-602.
- 120.- Criado Portal, A.J. et al.: " A contribution to the understanding of Solingen steel in the 19th century" / "Beitrag zum Verständnis von Solingensathl des 19 Jahrhunderts". Praktische Metallographie, 47(6), (2010), pp. 342-353.
- 121.- Criado Portal, A.J. et al.: " Análogos arqueológicos e industriales para almacenamientos profundos: estudio de piezas arqueológicas metálicas". Publicación técnica ENRESA, 7/2000, (2000).
- 122.- Criado Portal, A.J. et al.: " Análogos de los contenedores metálicos de almacenamiento". Publicación técnica ENRESA, 10/2000, (2000).
- 123.- Criado Portal, A.J. et al.: " Análogos arqueológicos e industriales para almacenamiento de residuos radiactivos: estudio de piezas arqueológicas metálicas (Archeo-II)". Publicación técnica ENRESA, 3/2003, (2003).
- 124.- Criado Portal, A.J. et al.: "Analogue application to safety assessment and communication of radioactive waste geological disposal ilustrative synthesis". Colección Documentos I+D de ENRESA y Consejo de Seguridad Nuclear, 11, (2004).
- 125.- Criado Portal, A.J.: "Estructuras Metalograficas de Aleaciones Hierro-Carbono: aceros al Carbono y Fundiciones" Editado on line en www.antoniocriado.es , Madrid (2008).
- 126.- Stanley Smith, C.: "Sources of the History of the Science of Steel 1532-1786", The Massachusetts Institute of Technology Press. (1968).
- 127.- Porter, D.A.: "Phase transformations in metals and alloys" Edit. Van Nostrand Reinhold Company Ltd, London, (1981), pp. 279-287.
- 128.- Hoyland, R.G. and Gilmour B.: "Medieval Islamic swords and swordmaking. Kindi's treatise "On swords and their kinds" (edition, translation and commentary)". Edit. Gibb Memorial Trust, Oxford, (2006), pp. 14-47 y 148-155.
- 129.- Criado Portal, A.J. et al.: "Metalografia en color de estructuras de temple en aceros al carbono y aleados, y fundiciones de hierro". Revista Pracktische Metalography. (aceptada, pendiente de publicación).

130.- Lévi-Provençal, E.: “La civilización árabe en España”. Edit. Espasa-Calpe, Buenos Aires, Argentina, (1953).

131.- Lévi-Provençal, E.: “España musulmana hasta la caída del Califato de Córdoba (711-1031)”. Vol.4 de la Historia de España de Ramón Menéndez Pidal, Edit. Espasa-Calpe, Madrid, España, (1982).

132.- Lévi-Provençal, E.: “España musulmana hasta la caída del Califato de Córdoba (711-1031)”. Instituciones y vida social e intelectual, vol.5 de la Historia de España de Ramón Menéndez Pidal, Edit. Espasa-Calpe, Madrid, España, (1982).

133.- Ibn Hayyân al Kurtubi: “Mugtabis II (Anales de los emires de Córdoba Alhaquen I y Abderrahman II)”. Edición facsímil de un manuscrito árabe de la Real Academia de la Historia (Legado Emilio García Gómez), Madrid, España, (1999).

134.- Editores Makki, M.A. y Corriente, F.:”Crónica de los emires Alhakam-I y Abderrahman II entre los años 796 y 847 (Al Mugtabis II)”. Zaragoza, España, (2001).